REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA



***F**aculté de **T**echnologie*

Mémoire de fin d'étude de Master

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Ingénierie des matériaux et des surfaces

***Thème** :*

Substitution de la fonte grise sphéroïdale d'importation par la fonte grise lamellaire locale pour produit voirie équivalent utilisant la simulation numérique

---

Présenté par :

Bouguettaya Said

HigouneAdel

Proposé et Dirigé par :

Dr. RABHI Redha

Mr.HABIRECHE Mohamed.

Promo 2019

Je dédie ce modeste travail :

A mon très Père et A ma chère Mère

A mes chers Frères et A mes chères sœurs

A mes chers et fidèles amis

A toute la promotion génie mécanique 2019-2020.

Remerciements

Je saisi cette opportunité pour remercier en premier lieu mon encadreur Dr. REBHI Redha et Mr. HBIRACH Mohamed, pour tout ce qu'ils ont fait pour nous, en me conseillant, en m'aidant et le long du chemin du mémoire.

Je remercie par la même occasion les membres du Jury, pour l'intérêt qu'ils ont montré en acceptant de lire et d'examiner notre modeste travail.

Un grand merci à tous les enseignants de département génie mécanique qui n'ont pas cessé un instant à contribuer à la bonne marche de ce travail.

Enfin, je remercie toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

RÉSUMÉ

Le secteur voirie est aujourd'hui un marché de plus en plus concurrentiel. Pour rester compétitif, il est indispensable de pouvoir abaisser notablement les couts de fabrication, sans pour autant sacrifier la qualité due à ces produits techniques, soumis à de très fortes contraintes de sécurité.

Mots clés :

ABSTRACT

The road sector is today an increasingly competitive market. To remain competitive, it is essential to be able to significantly lower manufacturing costs, without sacrificing quality due to these technical products, subject to very strong security constraints.

Keywords

ملخص

يعد قطاع الطرق اليوم سوقًا تنافسيًا متزايدًا. للمحافظة على قدرتك التنافسية، من الضروري أن تكون قادرًا على خفض تكاليف التصنيع بشكل كبير ، دون التضحية بالجودة بسبب هذه المنتجات التقنية ، مع مراعاة القيود الأمنية القوية جدًا.

SOMMAIRE

Mémoire de fin d'étude _____ i

Dédicaces _____ **Erreur ! Signet non défini.**Remerciements _____ iii

RÉSUMÉ _____ iv

SOMMAIRE _____ v

LISTE DES FIGURE IIIS _____ viii

LISTE DES TABLEAUX _____ xi

INTRODUCTION GENERALE _____ 1

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES MATERIAUX _____ 3

I.1. Introduction _____ 3

I.2. Les matériaux _____ 3

I.2.1. Définition _____ 3

I.2.2. Classification des matériaux _____ 3

I.2.3. Comment choisir un matériau _____ 4

I.2.3.1. Aptitude à la mise en forme _____ 4

I.2.3.2. Capacité de valorisation _____ 4

I.2.3.3. Coût de mise à disposition _____ 5

I.3. Le fer, l'acier et la fonte _____ 5

I.4. Les fontes _____ 6

I.4.1. Définition _____ 6

I.4.2. Les composites de la fonte _____ 6

I.4.2.1. Ferrite _____ 6

I.4.2.2. Cémentite _____ 7

I.4.2.3. Perlite _____ 8

I.4.2.4. Graphite _____ 9

I.4.3. Différents types des fontes _____ 10

I.4.3.1. Fonte grise _____ 10

I.4.3.2. Fonte truitée _____ 11

I.4.3.3. Fonte blanche _____ 11

I.4.3.4. Fonte malléable _____ 11

I.4.4. Principales utilisations des fontes _____ 12

I.5. Les fontes grises _____ 12

I.5.1. Fonte à graphite lamellaire (FGL) 14
I.5.2. Fonte à graphite sphéroïdale (FGS) 14
I.6. Caractéristiques mécaniques des fontes grises 15
I.6.1. Propriétés mécaniques diverses des fontes 16
1.6.1.1. La dureté 16
I.6.1.2. L'essai de traction 16
I.6.1.3. La résilience 18
I.6.1.4. Les essais de fluage 18
I.6.1.5. Les essais d'endurance 18
I.6.2. Facteurs exerçant une influence sur les caractéristiques mécaniques 19
I.6.2.1. Microstructure 19
I.6.2.2. Composition chimique 19
I.6.2.3. Influence de l'épaisseur 19
I.7. Traitements thermiques 20
I.7.1. Relaxations des contraintes de coulée 20
I.7.2. Recuit d'adoucissement 21
I.7.3. Trempe et Revenu 21
I.8. Conclusion 21
CHAPITRE II : LES MATÉRIAUX CHOISIS (EXEMPLE DE POVAL) 24
II.1. Introduction 24
II.2. Elaboration de la fonte à graphite lamellaire (FGL) 24
II.2.1. Définition 24
II.2.2. Procédés d'élaborations de la fonte FGL 26
II.2.2.1. Étapes d'élaboration de la fonte 26
II.2.2.2. Préparation des échantillons 28
II.2.2.2.1. Le prélèvement de l'échantillon 28
II.2.2.2.2. L'enrobage de l'échantillon 28
II.2.2.2.3. Le polissage de l'échantillon 28
II.2.2.2.4. L'attaque de l'échantillon 29
II.3. Elaboration de la fonte FGL 20 (POVAL à Berrouaghia) 29
II.3.1. Procède d'élaboration FGL20 (POVAL) 29
II.3.2. Lit de fusion de FGL20 30
II.4. Etude et caractérisation des fontes 31
II.4.1. Module d'élasticité 31
II.4.2. Résistance à la compression, flexion et cisaillement 32
II.4.3. Résistance au choc – Résilience 33
II.4.4. Résistance à la fatigue 33
II.4.5. Résistance à l'usure par frottement 34
II.4.6. Résistance aux corrosions 34
II.5. Etude les caractéristiques de traction et dureté 34

II.5.1. Cas des fontes grises Lamellaires FGL 35
II.5.2. Cas des fontes à graphite sphéroïdal FGS 36
II.6. Quel type de choix 37
II.7. Conclusion 38
CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSION 40
III.1 Introduction 41
III.2 Définition 41
III.2.1 Présentation de SolidWorks 41
III.2.2 Présentation de l'ANSYS Workbench 41
III.3 Objectifs 42
III.4 L'effet du Module d'élasticité (Module de YOUNG) 42
III.5 L'effet de la considération de rainure 48
III.5.1 sans rainure 46
III.5.2 avec rainure 47
III.6 L'effet d'épaisseur 52
III.7 L'effet du matériau 57
CONCLUSION GENERALE 61
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 62

LISTEDESFIGURE. CHAPITRE I :GENERALITES SUR LES MATERIAUX

Figure I.1: Comment choisir un matériau [3]. 5
Figure I.2: Phase ferritique entourant les sphéroïdes de graphite pour la fonte detype EN-GJS-400-15 [8]. 7
Figure I.3:Microstructure d'une fonte EN-GJL-250 à matrice totalement perlitique [10].....8
Figure I.4: Microstructure d'une fonte EN-GJS-500-7 à matrice ferrito-perlitique [8]. 9
Figure I.5: Système de cristallisation hexagonal du graphite. 10
Figure I.6: Structure ferrito-perlitique d'une fonte grise (gauche), Structure perlitique d'une fonte grise (droite) [14].....11
Figure I.7: Diagramme alliage Fer-carbone.....13
Figure I.8: Taille et distribution des lamelles du graphite selon la norme ASTM-A-247 [21]. 14
Figure I.9: Image de gauche : indenteur type Vickers et empreinte type laissée par l'indenteur. Image de droite : dispositif d'essai de macrodureté. (1) écran de visualisation de l'empreinte ; (2) indenteur ; (3) platine porteéchantillon [25].....16
Figure I.10 : Image de gauche : éprouvettes de traction plates et cylindriques ; Image de droite : exemple de dispositif de traction..... **Erreur ! Signet non défini.**
Figure I.11: Essai de traction simple pour un matériau ductile. ..... **Erreur ! Signet non défini.**

CHAPITRE II : LES MATÉRIAUX CHOISIS (EXEMPLE DE POVAL)

Figure II.1: Les caractéristiques mécaniques des fontes grises Norme DIN EN 156 [25]. ..... **Erreur ! Signet non défini.**
Figure II.2: Schéma descriptifs des opérations d'élaboration de la fonte en POVAL [27]. 29
Figure II.3: Diagrammes extensométriques de traction et de compression d'une fonte grise perlitique. 35

CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSION.

Figure III 1: Déplacement directionnel,Module d'élasticité E = 60 GPa. 43
Figure III 2: Déformation élastique équivalente, Module d'élasticité E = 60 GPa. 43
Figure III 3: Contrainte équivalente, Module d'élasticité E = 60 GPa. 44
Figure III 4: Déplacement directionnel, Module d'élasticité E = 100 GPa. 44
Figure III 5: Déformation élastique équivalente, Module d'élasticité E = 100 GPa. 45
Figure III 6: Contrainte équivalente, Module d'élasticité E = 100 GPa. 45
Figure III 7: Déplacement directionnel, Module d'élasticité E = 150 GPa. 46
Figure III 8: Déformation élastique équivalente, Module d'élasticité E = 150 GPa. 46
Figure III 9: Contrainte équivalente, Module d'élasticité E = 150 GPa. 47
Figure III 10: Effet de module de Young. 47
Figure III 11: Déplacement directionnel, sans rainure, E= 150 GPa. 48
Figure III 12: Déformation élastique équivalente, sans rainure, E= 150 GPa. 48
Figure III 13: Contrainte équivalente, sans rainure, E= 150 GPa. 49
Figure III 14: L'effet de charge. 49
Figure III 15: Déplacement directionnel, avec rainure, E= 150 GPa. 50
Figure III 16: Déformation élastique équivalente, avec rainure, E= 150 GPa. 50
Figure III 17: Contrainte équivalente, avec rainure, E= 150 GPa. 51
Figure III 18: Comparaison entre l'application d'une force avec et sans rainure sur la pièce. 51
Figure III 19: Déplacement directionnel, épaisseur =20mm. 52
Figure III 20: Déformation élastique équivalente, épaisseur =20mm. 53
Figure III 21 : Contrainte équivalente, épaisseur =20mm. 53
Figure III 22: Déplacement directionnel, épaisseur =30mm. 54
Figure III 23: Déformation élastique équivalente, épaisseur =30mm. 54
Figure III 24: Contrainte équivalente, épaisseur =30mm. 55
Figure III 25: Déplacement directionnel, épaisseur =50mm. 55

Figure III 26: Déformation élastique équivalente, épaisseur =50mm. 56
Figure III 27: contrainte équivalente, épaisseur =50mm. 56
Figure III 28: L'effet de l'épaisseur. 57
Figure III 29: Déplacement directionnel, fonte graisse sphéroïdale. 57
Figure III 30 : Déformation élastique équivalente, fonte graisse sphéroïdale. 58
Figure III 31: Contrainte équivalente, fonte graisse sphéroïdale. 58
Figure III 32: Comparaison entre FGS et FGL. 59

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1:Effet du Silicium sur les pr0opriétés mécaniques de la ferrite [7].....7
Tableau 2: Propriétés mécaniques de la cémentite [7]. 7
Tableau 3: Propriétés mécaniques de la perlite [7]. 8
Tableau 4: Caractéristiques mécaniques principales du graphite [7]. 10
Tableau 5 Propriétés mécaniques et structures des fontes GS normalisées (Norme européenne EN 1563) [21].....17
Tableau 6 : Les caractéristiques mécaniques des fontes GL Norme DIN EN 156 [25]. 25
Tableau 7 : Propriétés mécaniques et structures des fontes GS normalisées (Norme européenne EN 1563) [21] 25
Tableau 8: Composition chimique de la charge de fonte FGL20 en POVAL. 30
Tableau 9: Estimation du module E_0 –module de Young - des fontes. 32

INTRODUCTION GENERALE

De par leurs caractéristiques physiques et mécaniques intrinsèques, les fontes à graphite sphéroïdal se positionnent clairement comme une alternative intéressante et pertinente aux aciers. En effet, les fontes FGS présentent des caractéristiques mécaniques qui permettent leur utilisation dans tous les secteurs de l'industrie et de la mécanique, y compris les plus sévères. Leur grande ductilité ainsi que leur ténacité supérieure celle des aciers sont également des atouts importants. De plus, leur coulabilité permet d'obtenir des pièces de forme complexes, tout en conservant un état de surface de bonne qualité. Enfin, il est également intéressant de noter que la masse volumique des fontes FGS est de 8% inférieure à celle des aciers. Ceci peut avoir un impact non négligeable dans un secteur où la masse est une problématique importante.

Transferts fonte FGS vers fonte FGL :

La démarche qui apparait naturellement est de remplacer certaines pièces en fonte FGS par la même pièce présentant le même design en utilisant une fonte à graphite lamellaire de caractéristique mécaniques équivalentes. Dans ce domaine, un exemple significatif est le transfert de fonte FGS vers la fonte FGL des pièces voirie 850. Ces pièces, étaient initialement réalisées en fonte FGS. Un travail collaboratif entre la fonderie de Berrouaghia et le laboratoire de simulation de l'université de Médéa, a permis, avec modification de la géométrie de la pièce, d'opérer un transfert vers une fonte à graphite lamellaire, présentant des caractéristiques mécaniques équivalentes, en utilisant le logiciel de simulation ANSIS.

Afin de répondre à la pression économique de plus en plus forte, il est nécessaire de pousser plus avant la démarche de transfert en s'intéressant au remplacement de pièces en fonte FGS par des pièces en fonte FGL. Ici, la démarche nécessite plus de savoir-faire et de compétences techniques, notamment en termes de conception et dimensionnement mécanique, car elle consiste en un changement du matériau.

Or, cette nuance de fonte FGS ne présente pas les mêmes caractéristiques mécaniques que les fontes FGL dans ce type d'application. Elles valent 400 MPa pour FGS 400-12 contre 300MPa pour les fontes FGL.il est donc souvent nécessaire de concevoir partiellement ou totalement la pièce afin qu'elle satisfasse aux exigences fonctionnelles en termes de tenue mécanique.

Dans de tels cas, les gains sont significatifs. Il Ya bien entendu les gains dus aux couts des matières premières (non utilisation du lingot SOREL et non utilisation des Ferro-magnésium) []

Conception :

Outre les transferts de technologie FGS vers FGL, le meilleur gain est obtenu lorsque la solution moulée en fonte est étudiée dès le démarrage du projet. Les fondeurs sont aujourd'hui capables, à partir d'un plan de définition et des zones fonctionnelles, de concevoir complètement les pièces de structure et de sécurité et ce par test numérique….

Chapitre I

GÉNÉRALITÉS SUR LES MATÉRIAUX DES FONTE

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES MATERIAUX DES FONTE

I.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présenterons quelques généralités de base sur les matériaux avec une attention particulière sur les fontes. Dans un premier temps, nous ferons une présentation générale sur différents types des fontes :leurs formations, leurs caractéristiques mécaniques et thermiques.Ensuite, l'accent sera mis aux fontes grises qui sera utilisée dans cette étude.

I.2. Les matériaux

I.2.1. Définition

Un matériau désigne toute matière utilisée pour réaliser un objet au sens large. Ce dernier est souvent une pièce d'un sous-ensemble. C'est donc une matière de base sélectionnée en raison de propriétés particulières et mise en œuvre en vue d'un usage spécifique. La nature chimique, la forme physique (phases en présence, granulométrie et forme des particules, par exemple), l'état de surface des différentes matières premières, qui sont à la base des matériaux, leur confèrent des propriétés particulières [1].

I.2.2. Classification des matériaux

On distingue quatre grandes familles de matériaux, basées sur leur structure atomique, à savoir :

Les matériaux métalliques : faisant intervenir une liaison métallique : matériaux durs, rigides et déformables plastiquement. Ce sont des métaux ou des alliages métalliques : fer, acier, aluminium, cuivre, bronze, fonte, etc. Les métaux et leurs alliages sont ordinairement bons conducteurs de la chaleur, de l'électricité, opaques à la lumière visible qu'ils réfléchissent ;

Les matériaux organiques ou polymères organiques – liaison covalente et liaison secondaire : matériaux constitués de molécules formant de longues chaînes de carbone, matériaux faciles à mettre en forme, ils supportent rarement des températures supérieures à 200 °C. Ce sont des matériaux d'origine animale, végétale ou synthétique : bois, coton, laine,

papier, carton, matière plastique, caoutchouc, cuir, etc. Ce sont presque toujours des isolants thermique et électrique ;

Les matériaux minéraux ou céramiques – liaison ionique et liaison covalente : matériaux inorganiques caractérisés par leur résistance mécanique et thermique (réfractaires). Ce sont des roches, des céramiques ou des verres : porcelaine, pierre naturelle, plâtre, etc. ;

Les matériaux composites : Ce sont des assemblages d'au moins deux des trois types de matériaux déjà cités, non miscibles : plastiques renforcés de fibre de verre, fibre de carbone ou de Kevlar, contreplaqué, béton, béton armé, etc. [2].

I.2.3. Comment choisir un matériau

Le choix d'un matériau se fait sur un compromis entre ses propriétés, et les contraintes qu'il doit satisfaire. D'une façon générale, les matériaux possèdent des propriétés communs, telle que [3] :

- Physiques : couleur, état de surface, résistance à la corrosion
- Electriques : conductibilité, isolation électrique
- Mécaniques : dureté (résistance à la compression), résistance à la flexion, à la torsion.
- Thermiques : conductivité thermique, résistance aux hautes températures

Des essais permettent de qualifier ces propriétés. Généralement, pour choisir un matériau,telle que présenté sur la Figure I.1, les aptitudes suivantes sont considérées :

I.2.3.1. Aptitude à la mise en forme

Les propriétés mécaniques des matériaux induisent des aptitudes au façonnage qui facilitent parfois la réalisation de certaines formes.

- - Aptitude aux déformations plastiques
- - Aptitudes à la coupe
- - Aptitudes au soudage
- - Aptitudes au collage

I.2.3.2. Capacité de valorisation

La valorisation d'un matériau consiste à en tirer une valeur en fin de vie (réutilisation, recyclage, incinération). Elle permet d'éviter l'épuisement des ressources pour le matériau, de diminuer l'impact carbone et de réduire les coûts.

I.2.3.3. Coût de mise à disposition

C’est la somme des coûts nécessaires pour produire la pièce (matière première, transformation,énergie, main d’œuvre, transport…) et pour la recycler (coût de valorisation).

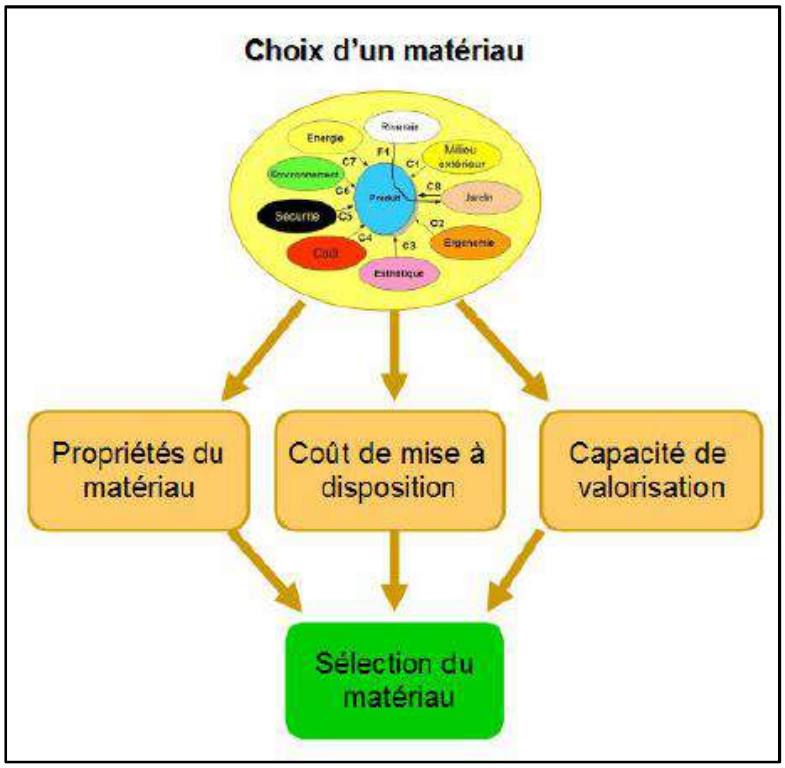


Figure I.1: Comment choisir un matériau[3].

I.3. Le fer, l’acier et la fonte

Le fer c’est un élément chimique abondant, il constitue une grande part du noyau terrestre et, de fait, de la masse de notre planète. Dans la croûte terrestre, on le trouve essentiellement sous forme d'oxydes comme l'hématite (Fe_2O_3) ou encore la magnétite (Fe_3O_4).

L'acier est l'autre alliage principal du fer. Il intègre lui aussi une part de carbone : entre 0,02 % et 2 % de la masse totale du morceau d'acier. Une fois trempé, l'acier devient encore plus dur que le fer. Il tient l'essentiel de ses propriétés de sa teneur en carbone. Lorsque celle-ci augmente, la dureté de l'alliage s'améliore et son allongement à la rupture diminue. L'ajout d'autres éléments, tels le chrome ou le nickel, permet aussi de modifier les propriétés physiques de l'acier.

Dans l'industrie, le fer est rarement utilisé à l'état pur. Il entre dans la composition de plusieurs alliages, l'un des principaux étant la fonte. Cet alliage est composé de fer et de

carbone à hauteur de 2 % à 6,67 %. Lorsque, dans la fonte, le carbone se présente sous forme de lamelles de graphite, on parle de fonte grise.

Contrairement aux idées reçues, la fonte n'est pas plus lourde que le fer. Elle présente une masse volumique comprise entre 6.800 et 7.400 kilogrammes par mètre cube alors que le fer se situe à 7.860 kilogrammes par mètre cube. La fonte n'est pas plus lourde que l'acier non plus -dont elle peut être un précurseur - à la masse volumique très proche de celle du fer [4].

I.4. Les fontes

I.4.1. Définition

Une fonte est un alliage métallique du fer riche en carbone, dont l'élément essentiel est le fer, et dont la teneur en carbone est supérieure à 2%. Il est à noter que la présence de fortes teneurs en éléments carburigènes peut modifier cette limite de la teneur en carbone. Dans la pratique les pourcentages de carbone se situent le plus souvent entre 3 et 4% [5, 6].

I.4.2. Les composent de la fonte

I.4.2.1. Ferrite

La ferrite est une solution solide d'insertion des atomes du carbone et d'autres inclusions dans le fer α, elle se cristallise dans un réseau cubique centré à température ambiante. La ferrite apparait au cours de refroidissement sous les formes eutectoïde et proeutectoïde. La limite de solubilité de carbone dans le fer α est de 0.02% à la température ambiante et de 0.1% à la température de la transformation eutectoïde.

La ferrite est un matériau très ductile et résilient, ces propriétés mécaniques dépendent de la taille du grain et de la proportion des éléments d'alliages susceptibles de se trouver en solution. Les propriétés mécaniques de la ferrite sont nettement améliorées, du fait de la présence du silicium en proportion considérable dans les fontes et de la limite de solubilité de silicium dans le fer α (entre 0.5 et 10%).

La microstructure de la ferrite, observée au microscope, se présente par une structure à grains homogène polyédrique. Pour les fontes ductiles, la ferrite se distingue de la cémentite après une attaque chimique au nital par un contraste clair entourant les sphéroïdes de graphite (Figure I.2).

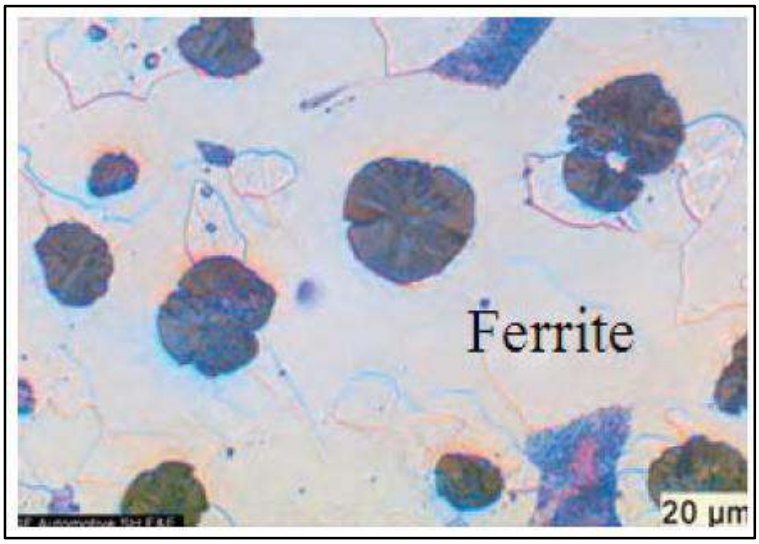


Figure I.2: Phase ferritique entourant les sphéroïdes matrice degraphite pour la fonte detype EN-GJS-400-15[8].

Dans le tableau 1, une ferrite pure est comparée à une ferrite à 3.4% de Silicium.

	Ferrite pure %	**Ferrite à 3.4% Si**
Rm (Résistance à la rupture)	275 MPa	530 MPa
HB (Dureté Brinell)	75 HB	150 HB
A (Allongement)	61 %	28 %

Tableau 1: Effet du Silicium sur les pr0opriétés mécaniques de la ferrite [7].

I.4.2.2. Cémentite

La cémentite ou carbure de fer (Fe_3C) est une combinaison chimique de fer et de carbone, qui se forme à partir de l'austénite lors d'un refroidissement rapide, suivant le diagramme métastable Fe-Fe_3C. La cémentite cristallise dans une maille orthorhombique. Les propriétés mécaniques essentielles sont la dureté élevée et la faible plasticité (tableau 2).

Tableau 2: Propriétés mécaniques de la cémentite [7].

Rm (Résistance à la rupture)	Très faible
HB (Dureté Brinell)	800-900HB
A (Allongement)	<<1 %

Dans les fontes grises, la cémentite se présente généralement sous forme dont la perlite [9]. La (Figure I.3) illustre la microstructure d'une fonte grise lamellaire où la perlite constitue la matrice pour les lamelles de graphite.

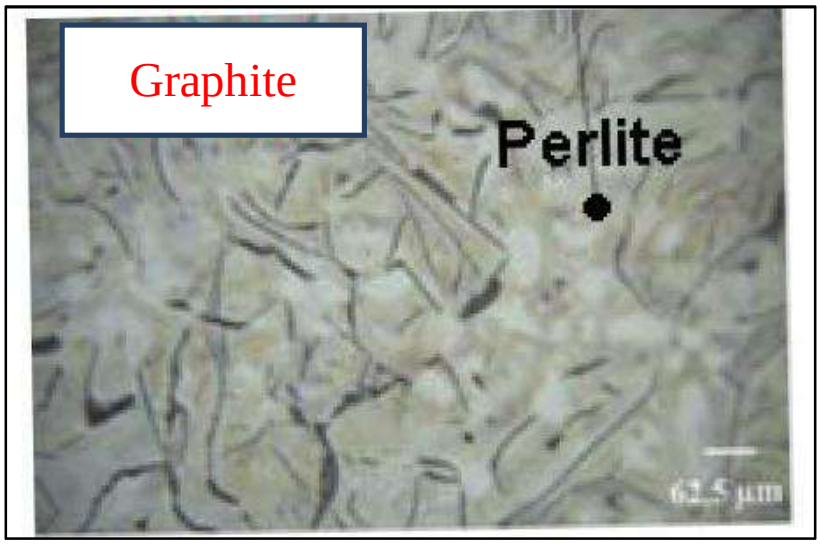


Figure I.3: Microstructure d'une fonte FGL-250 à matrice totalement perlitique [10].

I.4.2.3. Perlite

La perlite est obtenue lors du refroidissement par décomposition à température constante de l'austénite à 0.8% de carbone. Elle est formée de lamelles alternées de ferrite et de cémentite.

La finesse de la perlite est fonction de la vitesse de refroidissement, tandis que le rapport entre le fer α et la cémentite reste contant.

Les propriétés mécaniques de la perlite dépendent de la distance entre lamelles et des éléments d'alliages pouvant être présent en solution solide. La perlite devient plus dure et plus résistante lorsque la distance entre lamelles (D_0) est plus mince. En effet, la dureté est liée à la distance entre lamelles par l'équation de Belaieff($HB . D_0 = 80$).

Tableau 3: Propriétés mécaniques de la perlite [7].

Rm (Résistance à la rupture)	800-1000 MPa
HB (Dureté Brinell)	200-300
A (Allongement)	5-10 %

La morphologie de la perlite n'est pas révélée au microscope optique quand la distance entre lamelles devient très petite. Pour les fontes grises sphéroïdales à matrice ferrito-perlitique, la perlite apparait en contraste gris foncé après attaque chimique au nital (Figure I.4).

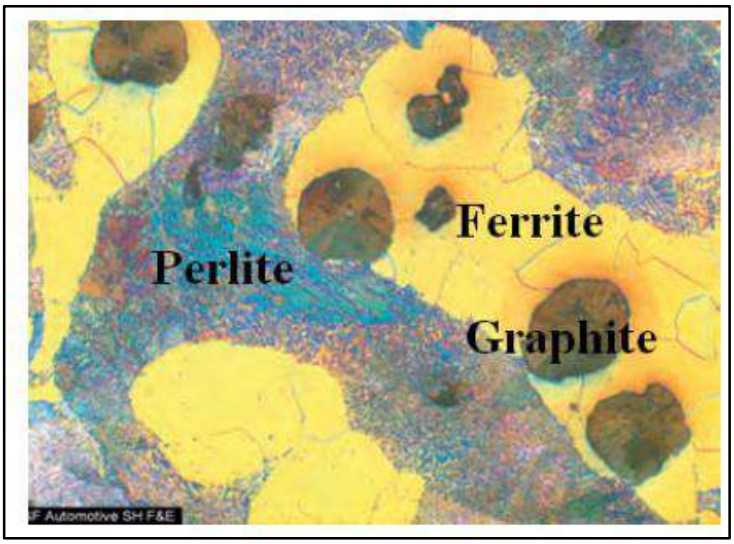


Figure I.4: Microstructure d'une fonte EN-GJS-500-7 à matrice ferrito-perlitique [8].

I.4.2.4. Graphite

Le graphite présent dans toutes les fontes grises et ductiles est une forme allotropique du carbone stable à température et à pression ambiante. Le graphite se cristallise dans un réseau hexagonal avec des liaisons covalentes dans le plan de graphène et des liaisons de Van der Walls entre ceux-ci, (Figure I.5) [11].

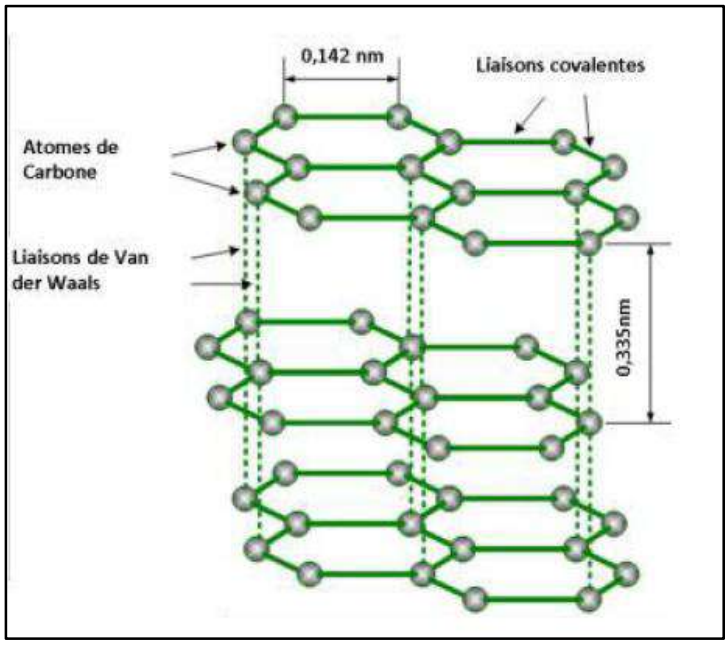


Figure I.5: Système de cristallisation hexagonal du graphite***[11].***

Le graphite présente de très faibles propriétés mécaniques (tableau 4). Il affaiblit les propriétés mécaniques des fontes grises, excepté la résistance à l'usure pour frottement lubrifié. Lors d'un chargement, le graphite entraine une concentration de contraintes.

Comparativement au graphite lamellaire, le graphite nodulaire permet à la fonte d'avoir des propriétés mécaniques proches de celles des aciers car la forme nodulaire minimise l'effet d'entaille dans la matrice [12].

Tableau 4: Caractéristiques mécaniques principales du graphite [7].

Rm (Résistance à la rupture)	15 MPa
HB (Dureté Brinell)	Nulle
A (Allongement)	0 %

I.4.3. Différents types des fontes

I.4.3.1. LES Fonte grise

Dans cette fonte, la plupart du carbone se trouve sous forme de lamelles de graphite formées par la solidification suivant le diagramme fer-graphite. Ce graphite donne aux fonte une cassure d'aspect gris, d'où leur nom de fonte grise.

La structure graphitique du carbone est obtenue par un refroidissement très lent de la fonte, ou l'ajout de composants graphitisant comme le silicium [13].

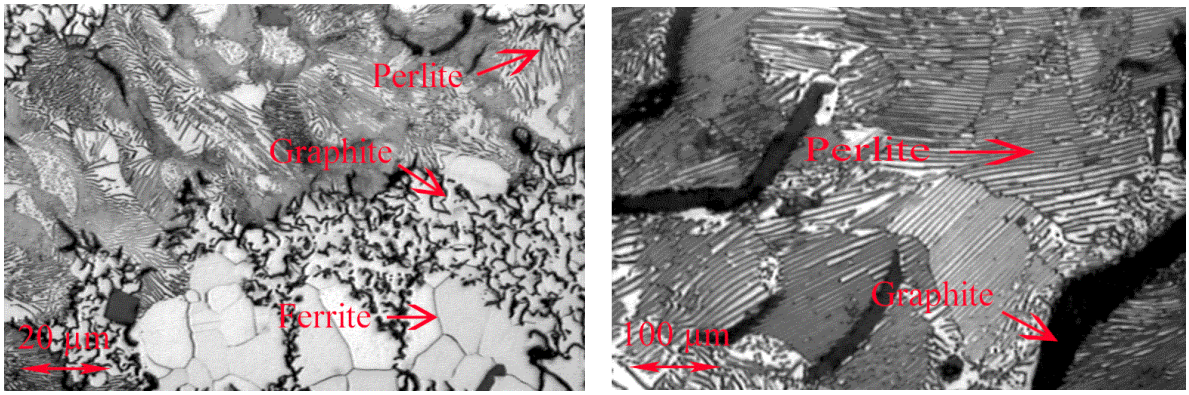


Figure I.6: Structure ferrito-perlitique d'une fonte grise (gauche), Structure perlitique d'une fonte grise (droite)[14].

I.4.3.2. Fonte truitée

La fonte truitée est celle dont la plus grande partie du carbone (> 0,8 %), se trouve sous forme de Fe3C, et dont la structure est composée de :lédéburite + perlite + graphite lamellaire [15].

I.4.3.3. Fonte blanche

Les fontes blanches, ainsi nommées en raison de l'aspect de leur cassure, correspondent à un alliage fer-carbone se refroidissant suivant le diagramme à cémentite. Les principaux facteurs favorisants l'obtention de ces fontes sont : l'abaissement de la température de coulée et refroidissement rapide, teneurs en carbone et silicium relativement faibles, teneur en manganèse élevée [16].

Les constituants de la fonte blanche sont ceux d'un acier hypereutectoïde, soit cémentite et perlite, d'où on distingue deux types de fonte qui sont :

- Fontes hypoeutectiques : lédéburite + perlite + cémentite proeutectoïde ;
- Fontes hypereutectiques : lédéburite + cémentite primaire.

I.4.3.4. Fonte malléable

Les fontes peuvent être alliées en particulier au nickel, au chrome et au molybdène. Le nickel affine le grain et améliore la résistance mécanique et la tenue à la corrosion. Le chrome crée, comme sur l'acier, un film résistant à la chaleur et à la corrosion. Le molybdène, jusqu'à environ 1 %, utilisé conjointement avec le nickel, améliore la dureté et la résistance à l'usure. Il existe au total de très nombreux types de fontes alliées, avec des teneurs en éléments très diverses, qui leur confèrent des propriétés analogues dans certains cas à celles des aciers ordinaires [15].

I.4.4. Principales utilisations des fontes

La fonte est utilisée pour tout type de pièces mécaniques. Pour leur majorité, les pièces sont obtenues par coulée du métal liquide dans des moules en sable siliceux.

- La fonte, et particulièrement la fonte FGS, est très utilisée par l'industrie automobile pour la fabrication, par moulage puis usinage partiel, des blocs moteur, des disques de freins, des tambours de freins ou encore des volants moteurs, organes de suspension, arbre à came, vilebrequin…etc.
- La fonte FGL est utilisée pour la fabrication de contrepoids (chariot élévateur), pour la réalisation d'éléments de chauffage, particulièrement ceux de haut de gamme.
- La fonte FGL est incontournable pour la réalisation des plaques de cheminée et d'inserts de cheminée.
- La fonte FGS est particulièrement utilisée en éléments de voirie comme les grilles et regards d'assainissement (grille d'égout).
- Les Fontes FGS et FGL sont utilisées pour la réalisation de mobiliers urbains comme les bancs et les rambardes ouvragées (Bouches de métro Guimard), et en ornementation de bâtiments comme les appuis de fenêtre, les rosaces de portail, les pics de grille.
- La fonte FGL est utilisée pour la fabrication de conduites et de tuyaux. A l'exclusion, depuis quelques années, des conduites de gaz de ville car elle est trop cassante vis à vis des sollicitations du trafic des véhicules lourds et particulièrement lors de l'utilisation de rouleaux compresseurs à vibration par les travaux de voirie.
- La fonte FGL est préférée pour la réalisation des bâtis de machines outil car elle a unetrès bonne capacité d'absorption des vibrations[17].

I.5. Cristallisation de fontes grises

Dans les alliages Fe-C (Figure I.7), lors du refroidissement le carbone se précipite sous la forme du carbone libre (graphite) dans un système stable fer-graphite ou d'une cémentite (Fe_3C) dans un système instable fer-cémentite. Les deux états sont caractérisés par une transformation eutectique. Du fait de l'écart entre les températures des deux transformations eutectiques est faible, la solidification d'un alliage Fe-C s'effectue aisément dans le système métastable. La formation de la perlite est plus facile que celle de la ferrite [18].

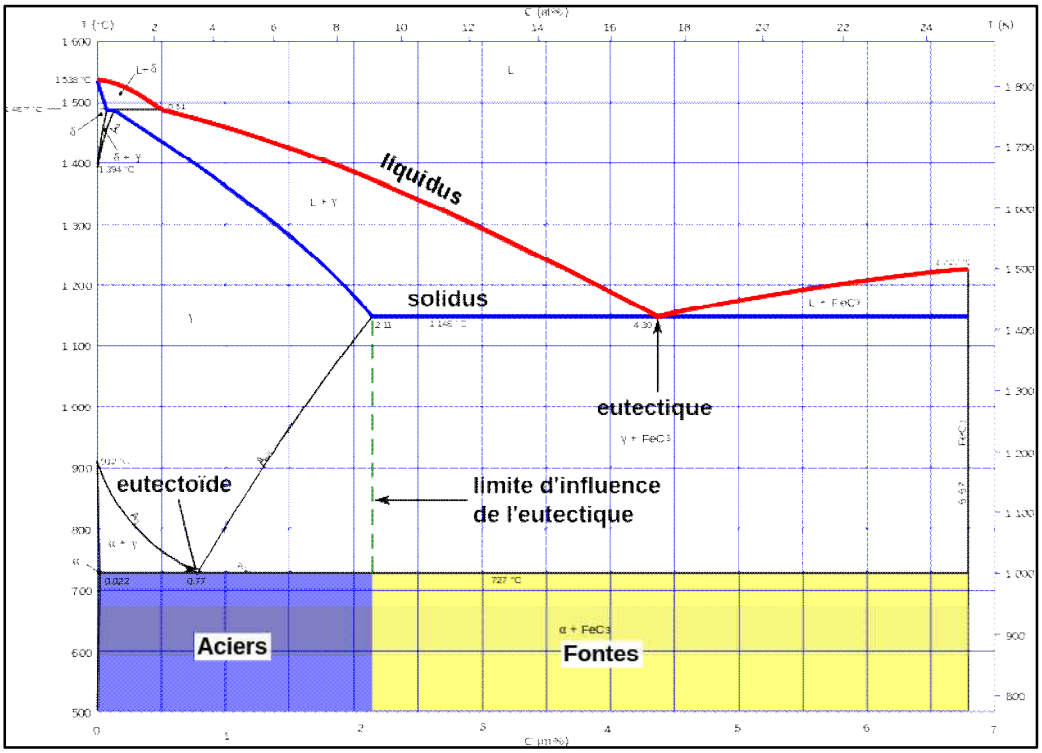


Figure I.7: Diagramme alliage Fer-carbone [18].

Les alliages du système fer-graphite sont nommés par des fontes grises, car le graphite donne un aspect grisâtre au faciès de rupture. Tandis que dans le système fer-cémentite, les alliages sont nommés par des fontes blanches, car la cémentite donne un aspect blanchâtre au faciès de rupture.

Les fontes grises sont élaborées à base d'alliages Fe-C-Si avec une composition chimique de 2,5 à 4% de C, 1 à 3% de Si, et des additions de manganèse au-dessous de 0,1% pour une microstructure ferritique et au-dessus de 1,2% pour une microstructure perlitique [19]. Dans la structure de ces fontes, la plus grande partie du carbone se trouve sous la forme du graphite. L'addition de l'élément d'alliage Silicium en proportion comprise entre 1.5 et 3.5% favorise la solidification du carbone dans le système stable ; il augmente aussi légèrement la température de transformation de l'eutectique stable et abaisse d'une manière significative celle de l'eutectique instable. Une proportion de l'ordre de 3% de Silicium, élargit le domaine entre les eutectiques stable et instables d'environ 50°C.

On distingue, selon la forme du graphite, les fontes grises lamellaires et les fontes grises sphéroïdales. Ces fontes sont désignées par le préfixe EN pour une norme européenne, suivi d'un groupe de lettre GJL qui représente la fonte lamellaire et GJS pour la fonte sphéroïdale, suivi d'un nombre correspondant à la résistance minimale à la rupture par extension en MPa

et suivi particulièrement pour la fonte sphéroïdale d'un nombre correspondant à l'allongement % après rupture [20].

I.5.1. Fonte à graphite lamellaire (FGL)

Dans les fontes grises lamellaires, les lamelles de graphite sont dispersées généralement dans une matrice perlitique. La structure perlitique de la matrice est favorisée par l'effet des éléments d'alliages (manganèse, molybdène, chrome, étain, nickel), tandis que les lamelles de graphite sont obtenues par l'effet graphitisant des éléments d'alliages (silicium, aluminium, titane) [22]. Les extrémités des lamelles du graphite sont des zones de concentration de contraintes où peuvent s'initier des fissures lors de sollicitations en traction alors que les efforts en compression sont mieux tolérés. Les meilleures propriétés mécaniques peuvent être obtenues sur la fonte grise alliée avec de fines lamelles de graphites réparties uniformément dans la matrice perlitique.

Il existe différentes tailles, formes et distributions des lamelles de graphite, les quelles sont classées en cinq (05) types selon la norme ASTM-A-247 [21] (Figure I.8).

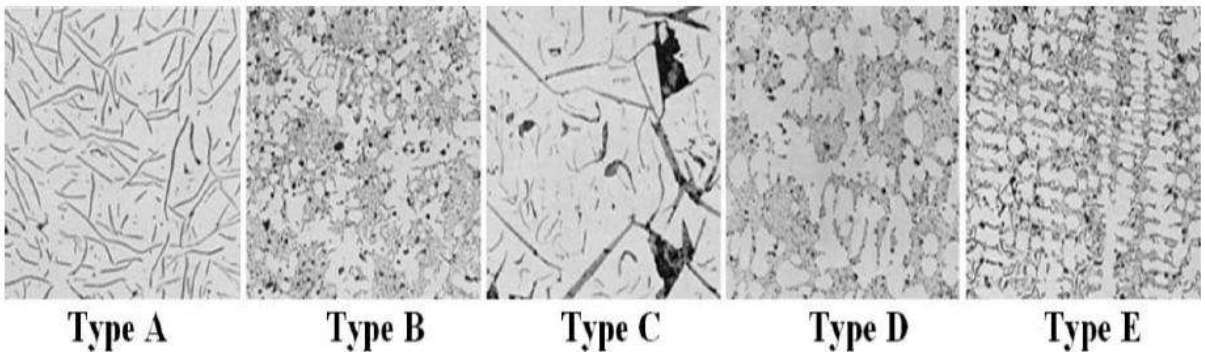


Figure I.8: Taille et distribution des lamelles du graphite selon la norme ASTM-A-247 [21].

Les avantages de cette fonte, tels que la facilité d'usinage, la bonne résistance aux vibrations et l'excellente coulabilité, les destinent principalement vers des utilisations dans les carters, bâtis, blocs moteur, les garnitures de piston, les disques de frein et les tambours.

I.5.2. Fonte à graphite sphéroïdale (FGS)

Les fontes à graphite sphéroïdal se distinguent des autres fontes grises par la forme sphéroïdale du graphite. L'élaboration de ces fontes consiste d'abord en la sphéroïdisation du graphite généralement par du magnésium à des proportions allant entre 0.03 et 0.06%. La

forme quasi sphérique du graphite supprime l'effet de crique, et les sphéroïdes deviennent ainsi des « arrêts de criques ».

La morphologie des sphéroïdes du graphite subit une modification durant le traitement thermique des fontes ductiles, par une intrusion de l'élément de la matrice, fer associé au silicium, à la périphérie du nodule du graphite [23].

De point de vue microstructural, les fontes grises sphéroïdales sont élaborées par des sphénoïdes de graphite soit dans une matrice ferritique pour une résilience et ductilité élevées du matériau, soit perlitique pour une résistance à la traction et frottement élevées, soit ferritoperlitique pour un compromis entre ces caractéristiques.

Les fontes à graphite sphéroïdale appelées aussi fontes ductiles sont utilisées pour la fabrication de culbuteurs, vilebrequins, pistons, soupapes, rouleaux de laminoirs, disques de frein. La fonte ductile perlitique est le matériau de base des arbres à cames et vilebrequins qui sont trempés en surface pour une meilleure résistance à l'usure.

I.6. Caractéristiques mécaniques des fontes grises

Les lamelles de graphite fragilisent la matrice du matériau. En effet, les extrémités des lamelles de graphite provoquent un effet "d'entailles" entraînant des amorces de rupture il en résulte donc une chute des caractéristiques mécaniques.

Les propriétés mécaniques des fontes à graphite lamellaire dépendent nettement de la vitesse de refroidissement, autrement dit de l'épaisseur de paroi de la pièce moulée. L'ordre des lamelles de graphite peut varier suivant la composition chimique de la fonte, des conditions de refroidissement et le nombre de germes présents dans le bain métallique apporté par l'inoculation. Ces fontes sont typiquement moins résistantes que les fontes blanches par exemple, mais offrent par la présence du graphite une capacité autolubrifiante et une capacité d'amortissement de vibration. Elles sont intéressantes par leurs propriétés de frottement liées à la présence des lamelles de graphite. La forme de ces dernières, de plus à l'échelle de quelques dizaines connue centaines de micron, est évidemment désavantageuse au niveau des propriétés mécaniques, donnant lieu à des concentrations de contraintes assez importantes. Les fontes grises à graphite lamellaire présentent des propriétés d'emploi uniques, dues pour la plupart au graphite. Ce dernier par son caractère lubrifiant joue un rôle primordial, il améliore l'usinabilité et le degré de finition [24].

I.6.1. Caractéristiques mécaniques diverses des fontes

1.6.1.1. La dureté

Elle s'exprime comme une résistance à l'enfoncement. En effet, à l'aide d'une bille, d'un cône ou d'une pyramide appliquée sur l'acier avec une force déterminée on peut calculer la dureté de la fonte, mais aussi mettre en évidence plusieurs propriétés, comme sa résistance à la déformation, ou encore la capacité de durcissement par déformation (écrouissage). La bille est composée d'acier dur ou de carbure de tungstène (essai Brinell). Le cône (essai Rockwell) ou la pyramide (essai Vickers) sont en diamant (Figure I.9). Les duretés des métaux ne peuvent être comparées que s'ils sont déterminés avec la même charge et la même méthode[25].

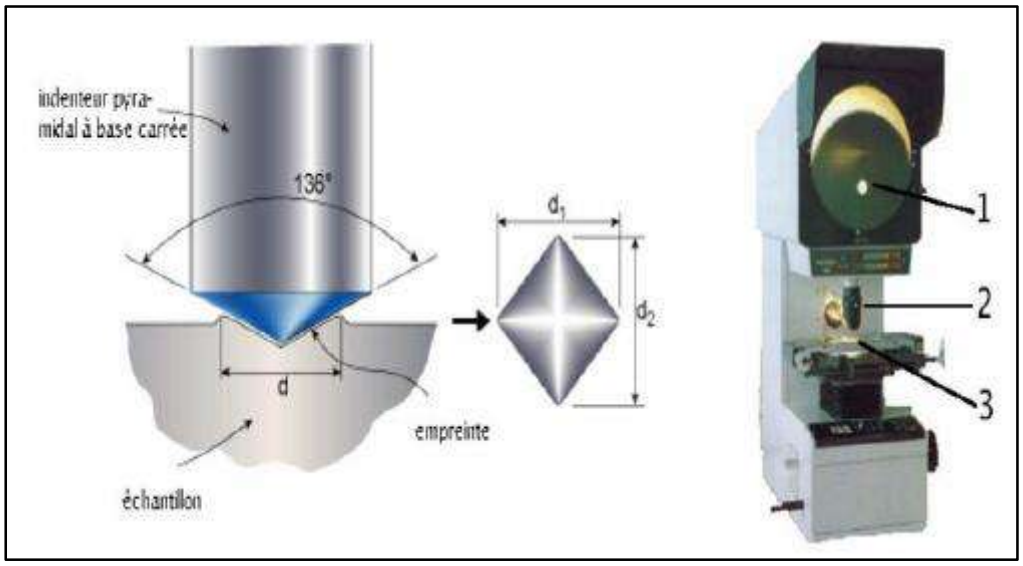


Figure I.9: Image de gauche : indenteur type Vickers et empreinte type laissée par l'indenteur. Image de droite : dispositif d'essai de macrodureté. (1) écran de visualisation de l'empreinte ; (2) indenteur ; (3) platine porteéchantillon[25].

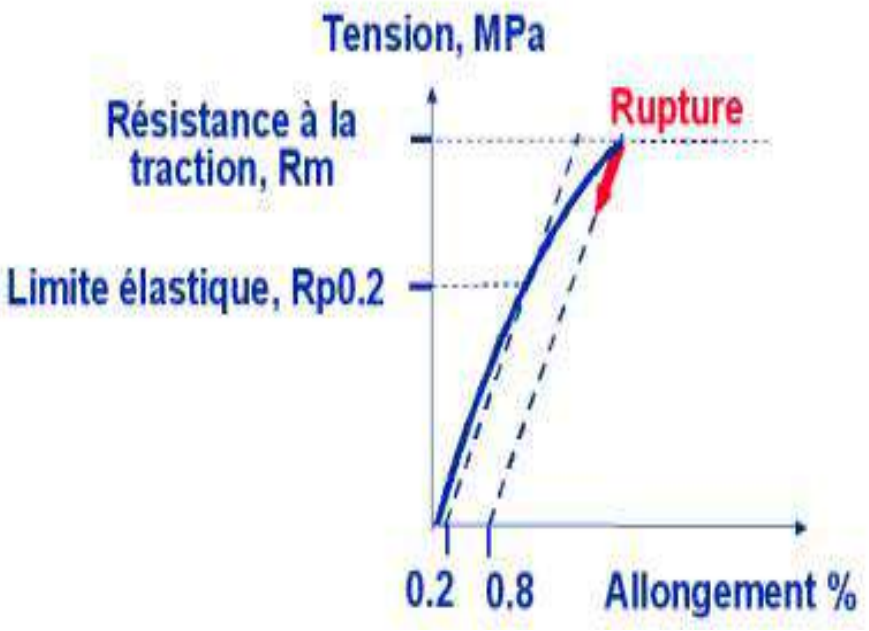
I.6.1.2. L'essai de traction

Depuis l'application aux fontes de la métallographie les caractéristiques mécaniques de ces matériaux, et notamment leur résistent traction, n'ont cessé de s'améliorer. Toutefois, l'allongement de rupture reste très fable en raison de la morphologie de graphite et on ne le mesure pas en pratique (et est généralement inférieur 1%)

D'âpres la résistons à la traction minimale granite mesure dans un barreau coule séparément de 30mmde diamètre ; la résistent à la traction (minimal) probable dans les pièces est indiqué sans garantie en relation avec l'épaisseur, suivent un tableau permettant de guider le choix de l'utilisateur (tableau) c'est la méthode de bas.

Tableau 5Propriétés mécaniques et structures des fontes GS normalisées (Norme européenne EN 1563) [21]

Désignation	R_m (MPa)	$R_{p0,2}$ (MPa)	A%	Structure de la matrice	Dureté (HB)
EN-GJS-700-2 (FGS 700-2)	700	470	2	Perlite	240-300
EN-GJS-600-2 (FGS 600-2)	600	400	2	Perlite	230-280
EN-GJS-500-7 (FGS 500-7)	500	350	7	Perlite-ferritique	210-260
EN-GJS-400-15 (FGS 400-15)	400	250	15	Ferrite	< 220
EN-GJS-350-22 (FGS 350-22)	350	220	22	Ferrite	< 200
EN-GJS-450-18 (FGS 450-18)	450	350	18	Ferrite renforcée	170-200
EN-GJS-500-14 (FGS 500-14)	500	400	14	Ferrite renforcée	185-215
EN-GJS-600-10 (FGS 600-10)	600	470	10	Ferrite renforcée	200-230



FUGURE I 10 **Tension-ALLONGEMENT, POURE UNE FONTE**

I.6.1.3. La résilience

C'est une grandeur caractérisant la ductilité de l'acier, et plus particulièrement sa résistance aux chocs. Elle exprime le travail (en J/cm2) nécessaire pour rompre un acier, par flexion sous l'effet d'un choc.

I.6.1.4. Les essais de fluage

Ils permettent de déterminer les propriétés d'un acier à une température élevée, comme la déformation en fonction du temps et le temps de rupture sous une charge déterminée.

I.6.1.5. Les essais d'endurance

Cet essai est aussi très important, car il se peut que certaines structures en acier se rompent sous une charge étant bien inférieure à la charge de rupture, à cause de l'usure ou encore à cause de la vétusté de la structure. Donc ce calcul permet d'éviter qu'une structure en acier rompe au fil du temps.

I.6.2. Facteurs exerçant une influence sur les caractéristiques mécaniques

I.6.2.1. Microstructure

Du point de vue microstructure, les fontes grises lamellaires contiennent du graphite en lamelles (ou graphite lamellaire) dispersées dans une matrice métallique à base de fer et de silicium. La quantité du graphite, la longueur des lamelles et la façon dont celles-ci sont reparties dans la matrice exercent une influence directe sur les propriétés de la fonte. Sa résistance mécanique et sa dureté dépendent de la matrice métallique dont les propriétés peuvent aller de celles d'un acier doux, à faible teneur en carbone, à celles d'un acier trempé à teneur en carbone élevée. Une matrice entièrement ferritique donne à la fonte une usinabilité élevée mais une résistance à l'usure et une résistance mécanique réduites. Les fontes grises à haute résistance se caractérisent par une matrice entièrement perlitique. Pour certaines applications, des pièces sont produites avec une matrice dont la microstructure est constituée à la fois de ferrite et de perlite, pour obtenir une dureté mécanique moyenne. Si une matrice de perlite très fine ou une matrice bainitique est recherchée, il faut avoir recours, soit à des éléments d'alliage, soit un traitement thermique [20].

I.6.2.2. Composition chimique

Les propriétés de la fonte grise dépendent, en particulier, de la composition chimique de celle-ci. La majeure partie du carbone présent dans la fonte grise se trouve sous forme de graphite. Un accroissement de la teneur en carbone total entraîne une augmentation de la quantité de graphite, d'où un abaissement de résistance mécanique et de dureté mais, par contre, une amélioration d'autres caractéristiques. Une certaine teneur en silicium est nécessaire pour provoquer la formation du graphite. Cet élément a une influence sur les propriétés de la fonte; en particulier, il lui confère une bonne résistance à la corrosion et à l'oxydation et, le cas échéant, il facilite le traitement de recuit.

I.6.2.3. Influence de l'épaisseur

L'épaisseur de la section dans laquelle une fonte est coulée est un facteur qui a une influence importante sur les propriétés des fontes grises. Dans le cas des fontes grises à graphite lamellaire, plus la solidification est lente, plus la dimension des lamelles est importante. Un ralentissement du refroidissement correspond à une diminution de la dureté de la matrice métallique. Par contre une fonte coulée dans une épaisseur très mince se solidifie très rapidement et peut être dure. Généralement une pièce en fonte grise d'épaisseur

non uniforme présente une différence de grosseur de graphite et de dureté. Ces différences de structure se traduisent par des différences de caractéristiques mécaniques dans l'ensemble de la pièce.

I.7. Traitements thermiques

Pour que l'acier ait une grande palette de propriétés, il nécessite un traitement thermique. La plupart du temps, on effectue ces traitements à la surface ou à une profondeur limitée de l'acier et la fonte. A part les fontes malléables et certaines fontes spéciales, il n'est en général pas nécessaire de traiter thermiquement les fontes.

Cependant, des traitements thermiques sont souvent utiles pour :

- La relaxation des contraintes de coulée ;
- L'amélioration des propriétés mécaniques ;
- Ou encore la correction des anomalies dues à une élaboration mal adaptée.

Les principes métallurgiques sont les mêmes que pour les aciers, à ceci près que le graphite et les carbures libres échangent réversiblement du carbone avec la matrice au cours du cycle thermique.

Les principaux traitements thermiques qui font le plus souvent l'objet d'une convention avec l'utilisateur sont décrits ci-après.

I.7.1. Relaxations des contraintes de coulée

Certaines pièces rigides et d'épaisseurs inégales doivent subir un traitement de relaxation afin d'éviter des ruptures et d'assurer la stabilité dimensionnelle en cours d'usinage.

Le traitement consiste à échauffer lentement les pièces dans un four jusqu'à une température choisie entre 550°C (fontes non alliées) et 650°C (fontes alliées) avec maintien de plusieurs heures jusqu'à uniformisation complète de la température. Le refroidissement dans le four est contrôlé (20 à 40°C/h) au moins jusqu'à 300°C, le défournement ne devant pas avoir lieu avant 100°C dans les cas les plus délicats. Il s'ensuit une légère baisse de dureté.

I.7.2. Recuit d'adoucissement

Le but est d'abaisser notablement la dureté en homogénéisant la structure avec disparition des carbures libres éventuels. Il peut s'agir d'un simple ajustement mais c'est aussi l'un des moyens courants d'obtenir une fertilisation, notamment pour les fontes GS.

Le réglage dépend en premier lieu de la teneur en silicium, élément ferritisant et graphitisant. L'usinabilité est améliorée avec, pour les fontes GS, un accroissement de la plasticité.

I.7.3. Trempe et Revenu

Par trempe et revenu, on peut régler la dureté mais surtout concilier au mieux l'usinabilité, la résistance à l'usure et les propriétés mécaniques de pièces hautement sollicitées. D'ailleurs, pour les fontes grises et blanches, on évite, si possible, la trempe à l'eau ou même à l'huile en raison des risques de tapures. Ces risques sont diminués si l'on pratique une trempe étagée en bain de sel, huile ou plomb entre 200 et 350°C [22].

I.8. Conclusion

A partir de 1948, la date de son invention, la fonte à graphite sphéroïdal devient de plus en plus utilisée. Ceci grâce aux performances mécaniques et tribologiques que peut offrir la fonte par rapport aux autres types d'acier. La fonte ductile est utilisée pour plusieurs applications structurelles particulièrement dans celles qui nécessitent une rigidité combinée avec une bonne usinabilité. Le second large domaine d'utilisation de la fonte ductile est l'industrie automobile grâce à la faible densité par rapport à l'acier 10%, sa bonne résistance à l'usure et son faible coefficient de frottement.

Dans ce chapitre nous rappelons les propriétés des fontes grises ainsi que leur mode de durcissement par des traitements de surface. Pour anoblir la surface des fontes et leur conférer une fonctionnalité spécifique, nous avons décrit différents modes de traitements de surface.

Chapitre II

LES MATÉRIAUX FONT CHOISIS (EXEMPLE DE POVAL)

CHAPITRE II : LES MATÉRIAUX CHOISIS (EXEMPLE DE POVAL)

II.1. Introduction

Dans ce chapitre, on va présenter les matériaux choisis dans la présente étude qu'il s'agit les fontes grises lamellaires de POVAL (FGL20). Dans un premier temps, les procédures générales d'élaboration de ces types des fontes ainsi que leurs principales caractéristiques seront présentées. Ensuite, une étude tenir compte les propriétésmécaniques (les résistances à la compression, au choc, à la fatigue, à l'usure et à la corrosion) de ses fontes sera mise en place. En fin, une étude comparative entre les FGL et d'autres types des fontes, telle que les fontes FGS sera présentée. Cette comparaison nous permettra d'analyser les points faibles et les points forts ainsi que l'avantages et les inconvénients dans l'utilisation de ces fontes (FGL).

II.2. Elaboration de la fonte à graphite lamellaire (FGL)

II.2.1. Définition

Ces fontes contiennent du graphite sous la forme de lamelles. Leurs principales caractéristiques sont une faible résistance aux chocs, une bonne conductivité thermique. Les plus économiques, les plus utilisées, ce sont les fontes de moulage par excellence. Le carbone se présente sous forme de fines lamelles de graphite qui lui donne une couleur « grise »[26].

Comme illustré dans la (Figure II.1), ces fontes possèdent les propriétés suivantes : bonne coulabilité ; bonne usinabilité ; grande résistance en compression et grandes capacités d'amortissement des vibrations. L'usure est exclusivement une usure par abrasion.

Leur composition chimique ne fait pas l'objet d'une définition imposée ; elle peut varier dans les limites suivantes en fonction des propriétés visées (et des conditions de coulée):

- Carbone : de 3.2 à 3,9 % ;
- Silicium : de 1,5 à 3 % (cet élément stabilise la ferrite) ;
- Manganèse : de 0,3 à 1,2 % ;
- Phosphore : de 0,1 à 1,2 % (cet élément participe au durcissement).

Tableau 6 : Les caractéristiques mécaniques des fontes GL Norme DIN EN 156 [25].

	EN-GJL-150	EN-GJL-200	EN-GJL-250	EN-GJL-300
C	3.4 - 3.60	3.20 - 3.40	2.90 - 3.10	2.90 - 3.10
Si	2.30- 2.60	2.0 - 2.40	1.80 - 2.10	1.60 - 1.90
Mn	0.60– 0.90	0.70 - 1.00	0.80 - 1.10	0.80 - 1.10
Structure				
Usinabilité	Très bonne	Très bonne	Très bonne	Très bonne
Résistance à l'usure	moyenne	bonne	Très bonne	Très bonne
Trempe superficielle	inadaptée	faible	bonne	Très bonne
Durcissement superficiel par nitruration	bon	bon	bon	Très bonne
Capacité d'amortissement	Très bonne	Très bonne	Très bonne	Très bonne

Tableau 7 : Propriétés mécaniques et structures des fontes GS normalisées (Norme européenne EN 1563) [21]

Fonte GS						
Caractéristiques mécaniques	**EN GJS 350 22 LT**	**EN GJS 400 18 LT**	**EN GJS 400 15**	**EN GJS 450 10**	**EN GJS 500 7**	**EN GJS 600 3**
Résistance à la rupture Rm MPA	350	400	400	450	500	600
Limite élastique à 0,2% RPO, 2 et MPA	220	240	250	310	320	370
Allongement en %	22	18	15	10	7	3
Résilience à 23°C	17	14	-	-	-	-
à -20°C	-	12	-	-	-	-
à -40°C	12	-	-	-	-	-
Dureté Brinell HBW	<160	130-175	135-180	160-210	170-230	190-270
Caractéristiques annexe	EN GJS 350 22 LT	EN GJS 400 18 LT	EN GJS 400 15	EN GJS 450 10	EN GJS 500 7	EN GJS 600 3
Module d'élasticité en GPA	169	169	169	169	169	174
limite d'endurance (1) en MPA	180	195	-	210	224	248
limite d'endurance (2) en MPA	114	122	-	128	134	149
Masse volumique ρ en kg/dm3	7,1	7,1	7,1	7,1	7,1	7,2
Conductivité thermique λ en W/(K.m)	36,2	36,2	36,2	36,2	35,2	32,5
Coefficient de dilatation linéaire α jusqu'à 200°C en 10-6/K	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5
Coefficient de Poisson						

Tableau II.2: Les caractéristiques mécaniques des fontes GS

Sur des pièces moulées, la résistance minimale à la traction de ces fontes peut varier de 80 à 315 N/mm2 selon la composition et les conditions de solidification et de refroidissement; l'allongement à rupture est faible et souvent inférieur à 1 %. La résistance au choc est faible, les lamelles constituant des amorces de rupture.

On ne peut pas faire d'essai de résilience (on peut réaliser un essai conventionnel sur éprouvette cylindrique). La masse volumique de ces fontes est de l'ordre de 7,2 kg/dm3 et leur module d'élasticité peut varier de78 000 à 143 000 N/mm2.

Ces fontes sont décrites par la norme NF EN 1561 qui propose les nuances désignées comme suit :

- EN-GJL 100 ou EN-JL1010 ;
- EN-GJL 150 ou EN-JL1020 ;
- EN-GJL 200 ou EN-JL1030 ;

Où les chiffres : 100, 150…350, représentent larésistance minimale à la rupture par traction. (en N/mm2).

II.2.2. Procédés d'élaborations de la fonte FGL

II.2.2.1 Étapes d'élaboration de la fonte

L'élaboration de la fonte grise lamellaire type FGL20 dans la fonderie est réglementée par lesétapes suivantes [25-27] :

1) Le stockage et le triage des déchets de récupération au niveau du parc à ferrailles.
2) Remplissage de palettes, pesant une tonne de poids, à l'aide d'un aiment.
3) La collecte des palettes de ferrailles près du four de fusion (Bennage), cela se fait d'après les étapes suivantes :
   - Analyse des différentes charges constituant le lit de fusion pour déterminer leurs compositions chimiques.
   - Ajustement du pourcentage du Carbone et du Silicium par additions des quantitiées nécessaire sous forme de graphite et de l'alliage Ferro-Silicuim et Ferro- Mn.
4) Le transfert pour fusion au niveau du four de 2emefusion, et de capacité 6 tonnes jusqu'à un 25 tonnes. Cette opération de transfert doit respecter les consignes suivantes :

- Le creuset du four ne doit jamais être vide pendant la « compagne ». En effet, elle doit contenir une quantité maximale (1/3 de la capacité totale de four), afin d'assurer une production plus homogène ; d'éviter les chocs thermique et mécanique sur le revêtement réfractaire du creuset, ainsi que pour utiliser l'inertie thermique du four ce qui diminue les temps de fusion,
- Pendant la fusion, on doit couler deux (02) médailles pour analyse chimique, et éprouvette de leur possible pour le contrôle visuel et l'autre pour les analyses au niveau de laboratoire.
- Suite aux résultats des analyses précédentes, on doit juger nécessairement de porter des corrections sur la teneur des élémentsprincipaux.
- Le degré de saturation, doit être égale à un (eutectique) pour une meilleure coulabilité.
- Décrasser la crasse de fusion avant le remplissage de la poche de coulée avec un moyen.

5) Préparation du chantier de moulage, pour l'opération de coulée :
   - Demande de la poche de coulée.
   - Inoculation de la poche de coulée par le Fe-Si, on ajoute 04 kg de Fe-Si fin pour une poche de coulée pèse 800 Kg pour la bonne coulabilité.
   - Garder la poche sous chauffage pour éviter des chocs thermiques pendant leur remplissage (car la température de fusion est très élevée).
   - La température de fusion est inversement proportionnelle à la taille de la pièce à coulée
   - Le chauffage de la poche est assuré par une combinaison entre le gaz et la pression.
   - Le décrassage de la poche est assuré par le SLAX.

   Le coulage des moules :L'excès ou le manque de métal fondu est coulé dans des lingots afin de les conserver et les réutiliser pour une nouvelle coulée.
6) Après le coulage, on procède au :
   - Décochage de la pièce ; pour les pièces avec noyau, on utilise le débourrage avec marteau.
   - Grenaillage ; lavage des pièces.
   - Ebarbage ; finition de la pièce.
   - Contrôle de qualité.
   - La peinture des pièces finis.

II.2.2.2 **Préparation des échantillons**

Chaque échantillon doit subir une certaine préparation avant la réalisation de l'essai, cette préparation est différente d'une technique à l'autre mais généralement on n'a pas plus de quatre types d'opérations qui on peut l'utiliser[28].

II.2.2.2.1. Le prélèvement de l'échantillon

Le prélèvement de l'échantillon doit se faire par une manière prudente et intelligente. Il n'y a pas de règles spécifiques à suivre car le choix de coupe dépend du type de l'essai ou l'analyse que l'on veut réaliser, les échantillons sont habituellement obtenus par découpage à partir de plaques ou barres. On doit empêcher l'échantillon de se chauffer pendant le découpage. Donc le découpage de l'échantillon recommander sous un jet d'eau ou liquide approprié.

II.2.2.2.2.L'enrobage de l'échantillon

Si l'échantillon est petit et sera difficile à polir tel quel ; on aura avantage à l'enrober. On a deux types de procédés d'enrobage, à chaud et à froid.

L'enrobage à chaud, la cohésion de la poudre thermoplastique ou thermodurcissable (Bakélite) avec l'échantillon dans le moule est assurée par le chauffage et la pression (5 bars, T° ,120°C à 180°C). Cette opération nécessite 7 min environ. Le refroidissement de moule prend 3min par circulation d'eau et on peut alors retirer l'échantillon enrobé.

Pour l'enrobage à froid, l'échantillon est plongé dans une résine durcie par un durcisseur. Mais demande plusieurs heures.

II.2.2.2.3. Le polissage de l'échantillon

C'est l'étape la plus difficile, la plus longue et la plus importante de la préparation d'un échantillon particulièrement l'échantillon métallographique.

Le but est d'obtenir une surface plane, exempte de raies bien dégraissées et sans déformation gênante. Il faut procéder en trois étapes qui sont ; stade de l'abrasion, polissage grossier et polissage final.

On utilise de nos jours la méthode du polissage électrolytique pour la préparation d'échantillons métallographiques.

II.2.2.2.4. L'attaque de l'échantillon

Cette opération est destinée pour l'examen métallographique. L'attaque fera apparaitre les différentes phases, les inclusions et les joints de grains de l'échantillon.

II.3. Elaboration de la fonte FGL 20 (POVAL à Berrouaghia)

II.3.1. Procède d'élaboration FGL20 (POVAL)

La (FigureII.2) suivante résume les étapes principales, en général six étapes, pour l'élaboration d'une fonte FGL20 en POVAL. Ses étapes sont [27] :

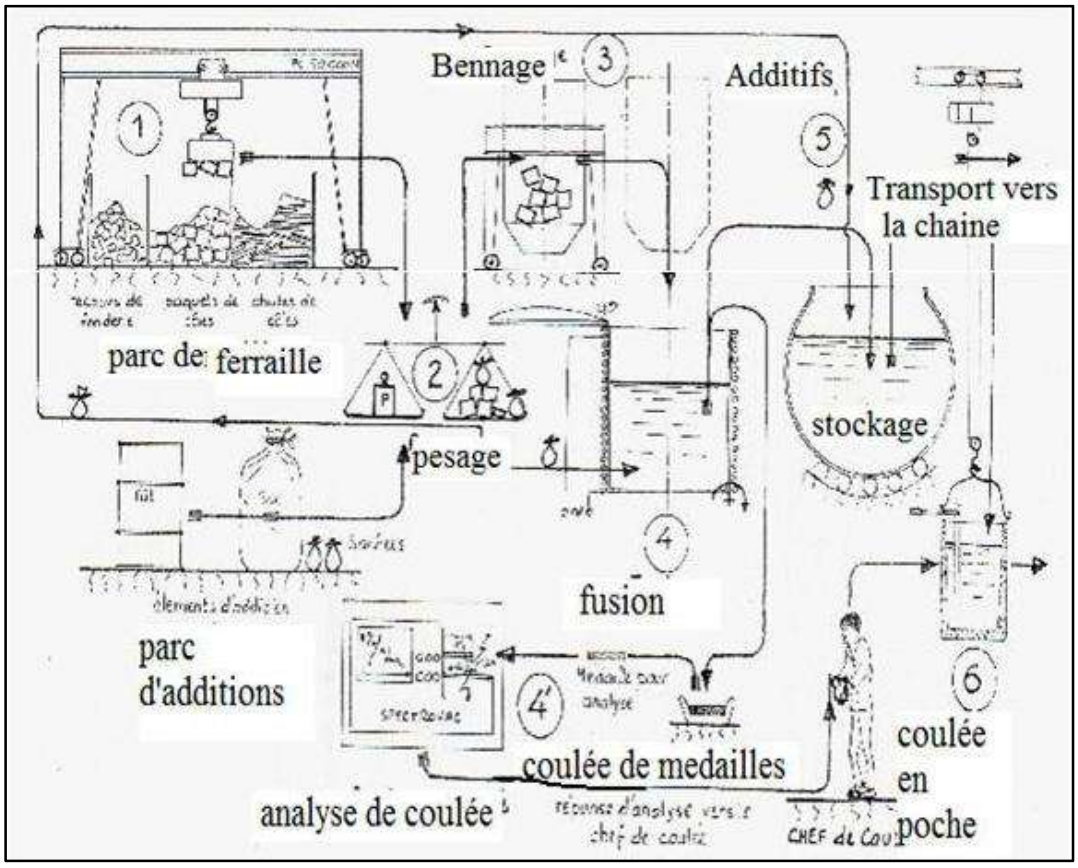


Figure II.2: Schéma descriptifs des opérations d'élaboration de la fonte en POVAL[27].

1) Préparation des matières premières (ferrailles + additions : retour externe, Hématite Ferraille d'acier, retour interne) ;
2) Pesage précis ;
3) Bennage des ferrailles vers les fours de fusion ;
4) Fusion au four à induction ;

5) Additions dans la poche de coulée et parfois nouvelle analyse d'un prélèvement ;
6) Transport des poches de coulée vers la chaine de moulage.

II.3.2. Lit de fusion de FGL20

La fonte FGL20 à POVAL contient les compositions suivantes [27] :

- Carbone, C = 3.2% - 3.6% ;
- Silicium, Si= 1.8% - 2.3% ;
- Manganèse, Mn ≤ 0.4% ;
- Phosphore, P≤0.20% ;
- Soufre, S≤ 0.02% ≈ 0.12%.

Le tableau 5 présente les caractéristiques de la fonte FGL20 élaborée en POVAL.

Tableau 8: Composition chimique de la charge de fonte FGL20 en POVAL.

Elément	**C (%)**	**Si (%)**	**Mn (%)**	**P (%)**	**S (%)**
Retour externe	3.5	2	0.45	0.2	0.02
Retour interne	3.4	1.8	0.4	0.2	0.02
Ferraille d'acier	0.12	0.1	0.38	0.017	0.022
Hématite (fonte d'acier)	4.3	2.3	0.38	0.12	0.04

Calcul lit de fusion pour une tonne :

On a comme donner :

- R_{ex} =60%
- R_{int} =10%
- Hématite =20%
- Ferraille d'acier =10%

Calcul de Carbone

- R_{ex} : $C=60 \times 3.5/100 = 2.1\ \%$
- R_{int} : $C=10 \times 3.5/100 = 0.34\ \%$

- Hématite : C=$20 \times 4.3/100 = 0.86\ \%$
- Ferraille d'acier : C=$10 \times 0.12/100 = 0.012\ \%$

Total de C= 2.1% + 0.34% + 0.86% + 0.012% = 3.312%

Puisque, le pourcentage de carbone (C=3.5-3.31=0.19%) ≈ 1.9 Kg pour une tonne, donc pour un four de 12 tonnes = 22.8 Kg.

Calcul de Silicium:

- R_{ex} : Si=$60 \times 2.0/100 = 1.2\ \%$
- R_{int} : Si=$10 \times 1.8/100 = 0.18\ \%$
- Hématite : Si=$20 \times 2.3/100 = 0.46\ \%$
- Ferraille d'acier : Si=$10 \times 0.1/100 = 0.01\ \%$

Total de Si= 1.2% + 0.18% + 0.46% + 0.01% = 1.85%

On a, Si=2.0% -1.85%=0.15%, et pour que Si =75 %, alors, Si=$0.15 \times 100/75 = 0.2\ \%$≈ 2.0 Kg pour une tonne, donc pour 12 tonnes = 24 Kg.

Calcul de manganèse :

%Mn =0.45*60/100+0.4*10/100+0.38*10/100+0.38*20/100=0.424%

II.4. Etude et caractérisation des fontes

Les caractéristiques de résistance à la traction et de dureté choisies pour définir les qualités normalisées de la plupart des matériaux métalliques ne suffisent pas à évaluer leur comportement mécanique général mais c'est encore plus vrai dans le cas des fontes moulées. En effet, comparées aux autres alliages, les fontes de construction (non blanches) ont un degré de liberté supplémentaire : le graphite. Or, l'effet des particules de graphite : forme, taille, quantité, interfère avec les propriétés de la matrice[29].

II.4.1. Module d'élasticité

Alors que la dureté dépend essentiellement de la matrice, le module d'élasticité est directement lié à la structure du graphite. Or, ce module est très important pour le concepteur.

Dès qu'une courbe effort–déformation n'est pas rectiligne, le module d'élasticité varie en tout point et l'on peut en prendre des valeurs moyennes correspondant aux domaines de contrainte utiles à considérer.

Dans le cas des fontes grises, on retient habituellement la valeur à l'origine E_0 – module de Young - qui correspond aux plus faibles contraintes. On peut évaluer E_0 d'après la pente à l'origine sur un diagramme de traction – compression ou de flexion mais d'autres méthodes plus commodes consistent à mesurer soit la vitesse de propagation du son, soit la fréquence de résonance qui sont proportionnelles à $\sqrt{E_0}$. Le tableau ci-dessous résume le domaine des valeurs du module d'élasticité pour les différentes nuances de fontes.

Tableau 9: Estimation du module E_0 –module de Young - des fontes.

Nuances	**Module d'élasticité E_0**
Fontes grises lamellaire FGL	60 à150 GPa (Selon nuance)
Fontes à graphite sphéroïdal GJS **GJMB**	160 à 190 GPa 160 à 190 GPa
Fontes malléables perlitiques GJMW	160 à 210 GPa
Fontes blanches GJN	200 à 210 GPa

II.4.2. Résistance à la compression, flexion et cisaillement

La résistance à ces sollicitations qu'on peut déterminer par des méthodes non normalisées et très conventionnelles ne présente un réel intérêt que dans le cas des fontes grises. Il est bien connu que les pièces en fonte grise se comportent mieux en compression qu'en traction. En écrasant une éprouvette usinée cylindrique dont le rapport hauteur/diamètre est de 2 ou 3, on constate que la charge unitaire d'effondrement en compression vaut 2,5 à 4 fois la résistance à la traction. Ceci a des conséquences favorables en cas de flexion[25, 30].

Ainsi le module de flexion d'un barreau droit usiné ou non, chargé entre deux appuis : MF = FLd/I ;avec : F la charge de rupture, L la distance entre les appuis, d la distance de la fibre neutre à la fibre la plus tendue, I le module d'inertie de la section par rapport à son axe, calculé à la rupture, vaut de 1,5 fois R_m pour R_m voisin de 400 MPa à 2,5 fois R_m pour R_m voisin de 100 MPa.

Les pièces en fonte grise peuvent donc supporter sans rupture des charges nettement supérieures à celles qu'on calculerait en résistance des matériaux classique à partir de R_m.

L'essai de cisaillement est exécuté habituellement, à l'aide d'un dispositif approprié, sur des petites éprouvettes usinées – diamètre de 5,64 mm - éventuellement très courtes, donc facile à prélever dans des pièces. La charge unitaire de rupture est reliée à R_m de façon peu précise mais on trouve en général un écart de 10 à 40 MPa en faveur de la résistance au cisaillement.

Rappelons que ces indications sur la compression, la flexion et le cisaillement ne concernent ni les fontes nodulaires, qui se comportent plutôt comme les aciers, ni les fontes blanches en raison de leur fragilité.

II.4.3. Résistance au choc – Résilience

Bien entendu, ni la résilience, ni la résistance au choc déterminées sur éprouvettes ne peuvent prédire le comportement d'une pièce industrielle soumise à des sollicitations brusques. Ainsi, une enclume en fonte grise suffisamment massive pourra résister à des chocs même violents. Beaucoup de pièces en fonte GS ou malléables perlitiques –matériaux dont la résilience Charpy V2 est à peine supérieure à celles des fontes grises – sont utilisées couramment pour des applications dites de « sécurité » et supportent très bien des chocs sans rupture – bras de suspension par exemple. A cet égard, le tracé de la pièce joue un rôle aussi important que la qualité du matériau[30].

II.4.4. Résistance à la fatigue

Bien qu'elles aient un comportement normal en fatigue selon les essais usuels, on ne contrôle pas industriellement la résistance à la fatigue des fontes ; toutefois, on peut indiquer des rapports d'endurance puisqu'on relève une nette limite de fatigue en coordonnées de Wöhler : par exemple, essai de flexion rotative sur éprouvette entaillée ou non.

Pour les fontes grises, peu sensibles à l'entaille, le rapport d'endurance est compris entre 0,33 et 0,60, les valeurs les plus faibles correspondant en général aux résistances R_m les plus élevés. Les meilleurs limites de fatigue sont néanmoins atteintes par les fontes les plus résistantes : 160 à 180 MPa pour R_m voisin de 400 MPa.

Pour les fontes GS et malléables, le rapport d'endurance sur éprouvettes non entaillées varie autour de 0,4 dans des limites plus étroites, mais l'effet d'entaille est

beaucoup plus sensible que pour les fontes grises dont le facteur de réduction est de l'ordre de 2[25].

II.4.5. Résistance à l'usure par frottement

Pour les fontes graphitiques – grises, GS et malléables - le coefficient de frottement est de l'ordre de 0,15 pour le glissement non lubrifié sur acier, et de 0,25 à 0,50 pour le glissement fonte sur fonte, mais l'influence de l'état de surface est considérable.

En première approximation, la résistance à l'usure augmente avec la dureté ; toutefois au contact de deux fontes – segment de chemise par exemple – ce n'est pas nécessairement la plus douce qui s'use le plus ; le module d'élasticité et la diffusivité thermique jouent également un rôle important. La dureté ne suffit donc pas à caractériser la résistance à l'usure.

On diminue considérablement l'usure de la fonte en la durcissant superficiellement soit par trempe martensitique, (chalumeau ou haute fréquence), soit par trempe carburique : par exemple, certains poussoirs de soupape coulés contre refroidisseur.

II.4.6. Résistance aux corrosions

Les fontes grises FGL et FGS sont couramment utilisées dans les milieux naturels, urbains ou industriels : atmosphères, eaux, sols. De faibles teneurs en chrome, cuivre, nickel, etc., peuvent être bénéfiques – dans l'eau de mer par exemple – mais sans changer fondamentalement le comportement. En outre, ces fontes ne sont que très peu attaquées par les alcalins et les solutions de carbonates alcalins ; elles résistent bien aux acides concentrés mais mal aux acides dilués.

En cas d'attaque rapide, on recourt soit à des revêtements superficiels tels qu'émaux, plastiques, soit à des fontes alliées.

II.5. Etude les caractéristiques de traction et dureté

Certaines applications mises à part (équipement sanitaire et domestique, cuves pour l'industrie chimique, mobilier urbain ornemental, etc.), la plupart des pièces moulées en fonte sont conçues en vue d'une fonction mécanique. Le matériau qui les constitue doit donc, comme dans le cas des aciers de construction, être défini à l'aide de caractéristiques mécaniques de référence ; les plus utilisées en pratique sont données par les essais de traction

et de dureté dans les conditions des normes particulières. On classe ainsi les fontes en « nuances » ou « qualités » échelonnées, offertes au choix du concepteur ou de l'utilisateur[25, 30].

II.5.1. Cas des fontes grises Lamellaires FGL

En raison de l'effet d'entaille du graphite lamellaire dans la matrice, le comportement des fontes grises sous sollicitation statique uni-axiale –traction et compression simples – est particulier.

Les particularités de ce comportement sont les suivantes (Figure II.3) .

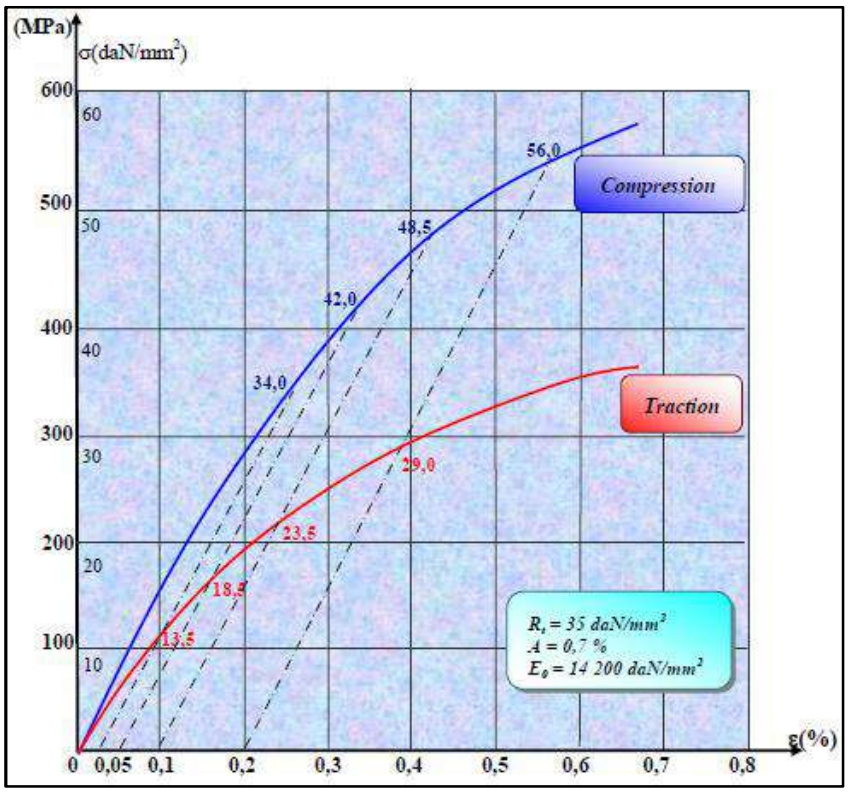


Figure II.3: Diagrammes extenso métriques de traction et de compression d'une fonte grise perlitique [25].

- La courbure du diagramme effort-déformation apparaît dès les plus faibles contraintes, sans limite d'écoulement définie ;
- Il existe une nette dissymétrie entre traction et compression ;
- Il y a rupture par traction sans déformation plastique notable (A<1%) sous une contrainte R_m caractérisant la nuance ;
- Le module d'élasticité E (représenté par la tangente à l'origine) est très largement variable selon la nuance.

La notion de limite d'élasticité s'applique donc mal aux fontes grises et c'est pourquoi la charge unitaire de rupture par traction Rm sert de base à toutes les classifications des fontes grises ; Rm est compris couramment entre 100 et 400 MPa, les valeurs les plus élevées correspondant à des fontes perlitiques de structure fine.

En harmonie avec l'ISO, la norme NF EN 1561 classe et désigne les fontes grises de plusieurs manières [25] :

- D'après la résistance à la traction minimale garantie mesurée dans une éprouvette coulée à part ;
- D'après la valeur de R_m mesurée dans des éprouvettes attenantes aux pièces ; la valeur minimale probable dans la pièce est donnée, à titre indicatif, selon l'épaisseur ; cette méthode ne peut s'appliquer qu'aux pièces assez grosses (épaisseur >20mm) ;
- D'après la dureté de Brinell –HB- mesurée sur les pièces elles-mêmes en des points convenus ; cette méthode est commode si la dureté présente plus d'intérêt que la résistance à la rupture en raison de ses rapports avec l'usinabilité et la résistance à l'usure.
- La dureté s'échelonne couramment de 100 à 300 HB.
- Les valeurs les plus élevées correspondent à des structures perlitique ou sorbotiques fines contenant éventuellement des éléments d'alliage et de fins carbures rendant à la limite l'usinage difficile.
- Les valeurs les plus basses correspondent à des structures à prédominance ferritique, bte nues éventuellement par recuit.

L'influence du graphite –forme, finesse et quantité – est beaucoup plus faible sur la dureté que sur la résistance à la traction.

II.5.2. Cas des fontes à graphite sphéroïdal FGS

Ces fontes sont réunies par les professionnels sous le vocable des « fontes à graphite nodulaire » afin d'exprimer que, malgré des techniques de fabrication et des développement fort différents, leurs propriétés, et en particulier leurs caractéristiques de traction, se ressemblent en se rapprochant de celles des aciers.

Leur diagramme effort – déformation présente les caractéristiques suivantes :

- En traction, comme en compression, il existe une partie sensiblement rectiligne avec une limite d'écoulement apparente, ce qui permet de caractériser une limite d'élasticité conventionnelle à 0,2% (R0,002) ;
- Ce diagramme et presque symétrique par rapport à l'origine ;
- Le module E_0 (module de Young) varie peu avec les nuances et, quoiqu'il soit inférieur à celui des aciers (=210 GPa), il est voisin de 180 GPa, nettement supérieur à celui des fontes grises les plus résistantes.
- La rupture se produit après un allongement pouvant atteindre 20% pour les nuances les plus « ductiles » ou les plus « malléables », avec $R_m \geq 400$ MPa.

Bien que les limites d'élasticité minimales soient garanties pour toutes les nuances, on observe que, par analogie avec la fonte grise lamellaire, la désignation des nuances rappelle les valeurs minimales de R_m et de A, sans faire apparaître R0,002[29].

II.6. Quel type de choix

Comme il a été déjà traité dans les sections précédentes, les fontes à graphite lamellaire ont, par rapport à d'autres alliages ferreux laminés ou moulés, des caractéristiques mécaniques de résistance, de plasticité et de ténacité nettement inférieures. Mais il ne faut pas oublier qu'en compensation, les fontes grises ordinaires présentent des propriétés d'utilisation tout à fait spécifiques, liées à la présence du graphite, et qui leur donnent, pour certaines applications, un avantage décisif [31] :

- Bonne tenue au frottement ;
- Capacité d'amortissement des vibrations exceptionnellement élevée ;
- Usinabilité généralement excellente (surtout après recuit) ;
- Bonne résistance à la corrosion par les sols et agents atmosphériques, les gaz de combustion, etc. ;
- Excellente tenue au choc thermique violent pour les qualités à bas module d'élasticité;
- Conservation des propriétés de -100 à +300^{o}C au moins (utilisation courante jusqu'à 500^{o}C) ;
- À défaut d'homogénéité, isotropie des propriétés.

En outre, ces matériaux jouissent de propriétés de fonderie remarquables (retrait faible ou même gonflement à la solidification, point de fusion bas), de sorte qu'ils apportent souvent

des solutions très économiques. C'est l'ensemble de ces propriétés plutôt que les caractéristiques mécaniques proprement dites qui on font l'intérêt.

Lorsqu'on a besoin d'une résistance, d'une plasticité ou d'une résilience que les fontes ordinaires ne peuvent pas offrir (même après traitement thermique), on fait appel à d'autres fontes dites spéciales telles que : les fontes malléables ou à graphite sphéroïdal et les fontes alliées.

II.7. Conclusion

La présentation effectuée dans ce chapitre, nous a permis de donner une meilleure compréhension sur le choix du matériau dans le respect des contraintes imposées par le cahier des charges, ainsi, sur les phénomènes et les incertitudes liées aux valeurs données. En effet, les caractéristiques mécaniques dépendent de la nature du matériau (acier ductile ou acier fragile), de sa composition et de la structure.

Il a été constaté que les fontes à graphite lamellaire possèdent, par rapport à d'autres types des fontes, des propriétés encourageants à les utiliser : caractéristiques mécaniques, plasticité et cout, etc.

Le prochain chapitre se situe dans ce contexte ; notre objectif est l'élaboration d'un modèle d'éléments finis spécialement conçus pour le calcul des structures en fonte grise lamellaire FGL20 de POVAL, en essayant d'optimiser l'utilisation de cette dernière afin de pouvoir remplacerles fontes grises sphéroïdales.

Chapitre III

RÉSULTATS ET DISCUSSION

CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSION

III.1 Introduction

L'objectif principal de ce chapitre est de présenter les deux logicielsutilisés au cours de ce travail, à savoir : le logiciel de SOLDWORS et de ANSYS Workbench, ce qui nous ont permis de mettre en place la conception et la simulation de la pièce étudiée. Ensuite, nous allons présenter et interpréter les résultats de la simulation numérique qui ont été obtenus en appliquantdes forces de compression sur la pièce avec prise en considération la variation dedifférents facteurs.

Le but de la présente étude est de développer la structure de la pièce en changement son épaisseur pour être plus résistant aux grandes pressions.

III.2 Définition

III.2.1 Présentation de SolidWorks

Le logiciel de conception mécanique SolidWorks est un outil de conception et de modélisation volumique paramétré, basé sur des fonctions, qui tire parti des fonctionnalités de Windows TM, connu pour sa convivialité. On peut créer des modèles volumiques 3D entièrement intégrés avec ou sans contraintes tout en utilisant des relations automatiques ou définies par l'utilisateur pour saisir l'intention de conception. Un modèle SolidWorks est entièrement intégré par rapport aux mises en plan et aux assemblages qui le référencent. Les changements introduits dans le modèle sont entièrement reflétés dans les mises en plan et les assemblages qui lui sont associés. Inversement si on effectue des changements dans le contexte d'une mise en plan ou d'un assemblage, ces changements sont reflétés dans le modèle. Les relations géométriques telles que les relations parallèles, perpendiculaires, horizontales, verticales, concentriques et coïncidentes sont des exemples des contraintes supportées par SolidWorks. Des équations peuvent également être utilisées pour établir des relations mathématiques entre les paramètres. Par ces moyens on peut garantir que des concepts seront établis et conservés.

III.2.2 Présentation de l'ANSYS Workbench

L'ANSYS Workbench est un ensemble des logiciels séparés dans différents domaines de recherche : véhicules à moteur, la construction, le service électronique, d'énergie, la fabrication, nucléaire, les plastiques, le pétrole, et les industries en acier. En outre, beaucoup de sociétés de consultation et centaines d'universités utilisent ANSYS Workbench pour

l'analyse, recherche, et l'utilisation éducative.Il est identifié dans le monde entier pendant qu'un des programmes le plus extensivement utilisés et capables de son type. Dans l'ANSYS Workbench, il existe un logiciel intégré appelé STATIC STRUCTURE qui est basé sur la méthode des éléments finis. Ce dernier qui a été utilisé dans ce travail afin de faire la simulation de la pièce.

III.3 Objectifs

L'objectif principal de ce travail est de faire une étude paramétrique qui va tenir compte la variation de plusieurs paramètres, à savoir : l'effet du module de Young, l'effet de rainure, l'effet de charge et l'effet de l'épaisseur pour la pièce conçue par la fonte grise lamellaire. En fin, la simulation du cas de la fonte grise sphéroïdale également sera effectuée afin d'analysé du type des fontes utilisés sur la structure de la pièce étudiée. Les résultats seront analysés par rapport le déplacement, la déformation et la contrainte équivalente

III.4 L'effet du Module d'élasticité (Module de YOUNG)

Les Figure III de 1, 4 et 7 présentent les contours de déplacement sur les faces supérieures et inférieures pour les modules de Young 60, 100 et 150 GPaet une charge de 26 Ton, respectivement. Les Figure III2, 5 et 8 présentent les contours de déformation élastique équivalente sur les faces supérieures et inférieures. Les Figure III3, 6 et 9 présentent les contours descontraintes équivalentes sur les faces supérieures et inférieures.

A partir ces Figure III, on constate que la pièce FGL étudiée est influencée par le module de Young, le déplacement, la déformation et les contraintes diminuent considérablement avec l'augmentation de ce dernier (module de Young). Ce qui expliquepourquoi on cherche des matériaux avec un module de Young important dans l'industrie pour ce génère des problèmes.

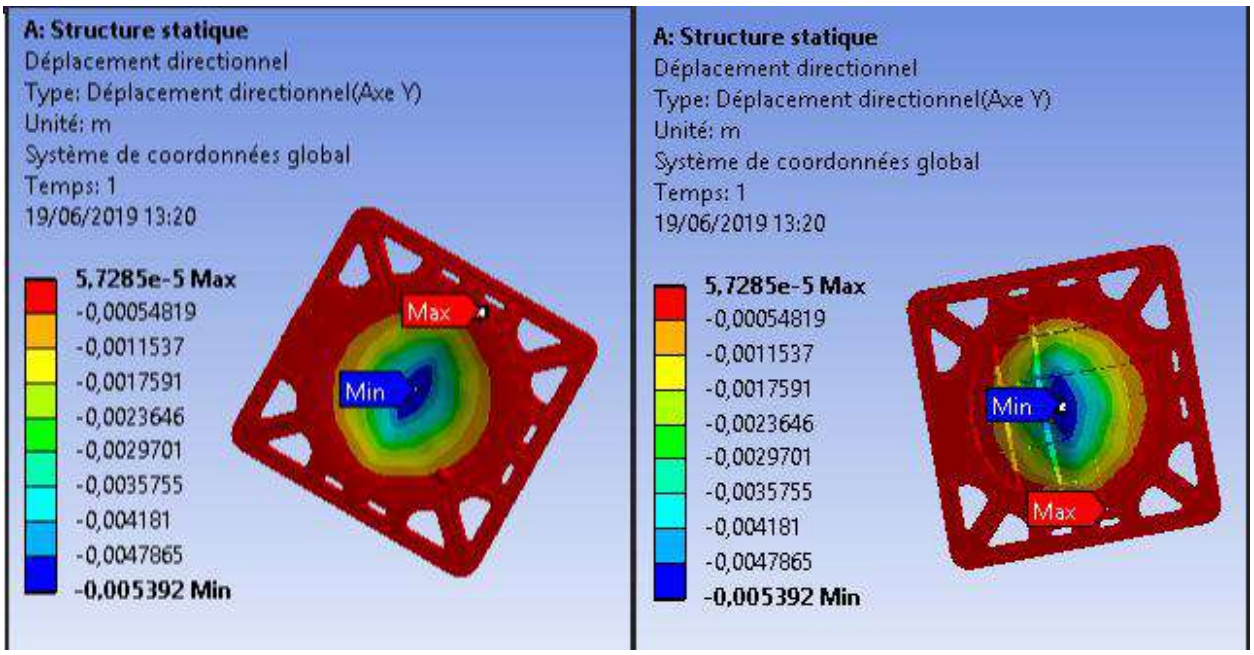


Figure III.1: Déplacement directionnel,Module d'élasticité E = 60 GPa.

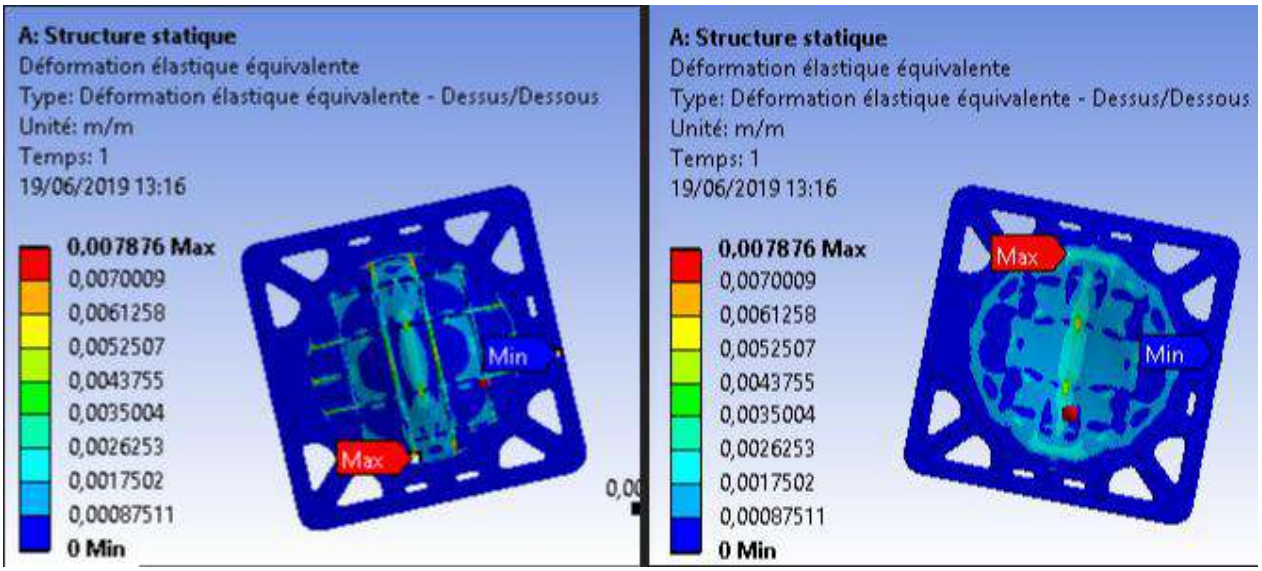


Figure III.2: Déformation élastique équivalente, Module d'élasticité E = 60 GPa.

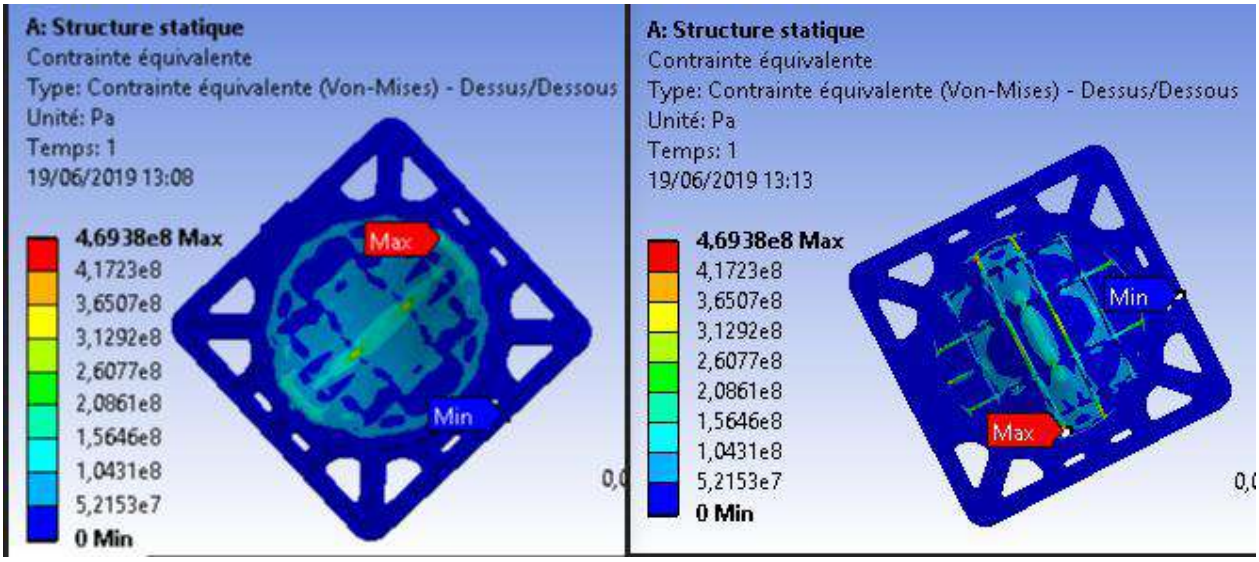


Figure III.3: Contrainte équivalente, Module d'élasticité E = 60 GPa.

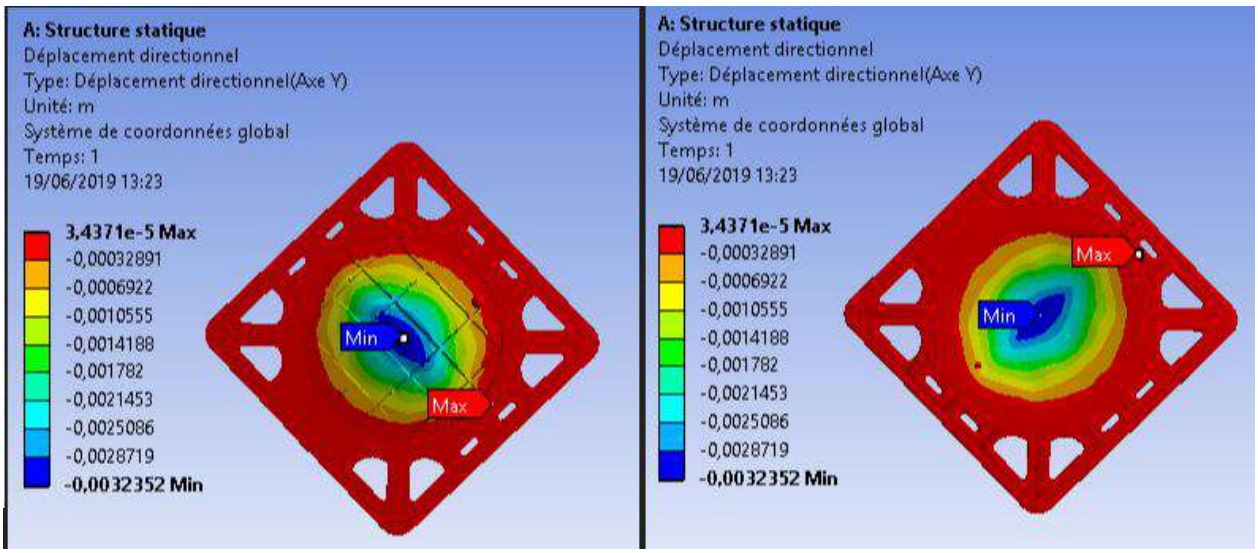


Figure III10: Déplacement directionnel, Module d'élasticité E0 = 100 GPa.

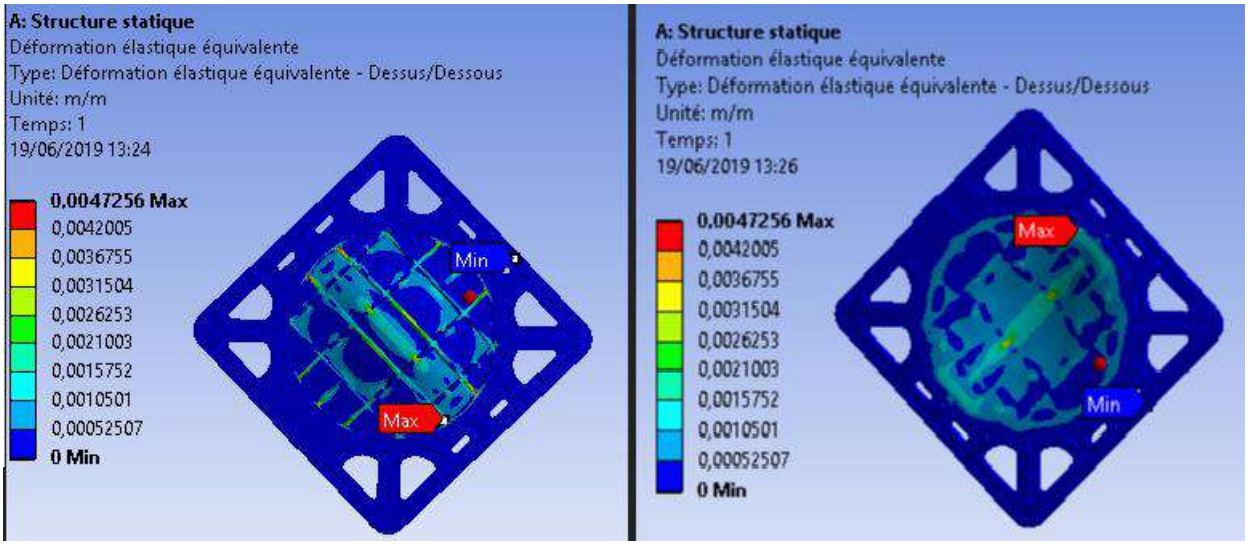


Figure III.5: Déformation élastique équivalente, Module d'élasticité E0 = 100 GPa.

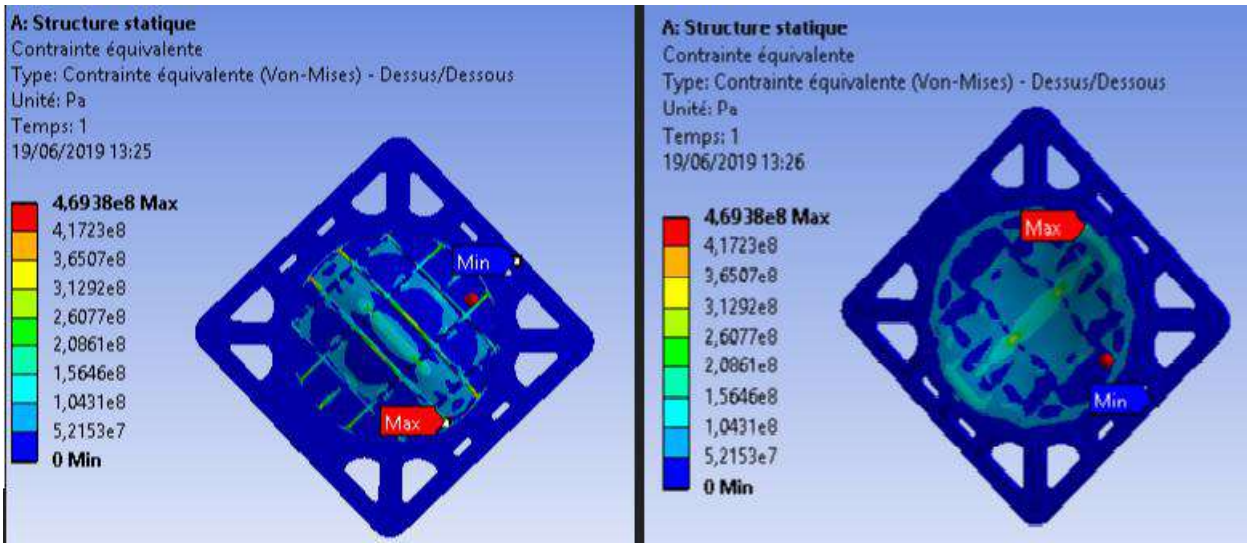


Figure III.6: Contrainte équivalente, Module d'élasticité E0 = 100 GPa.

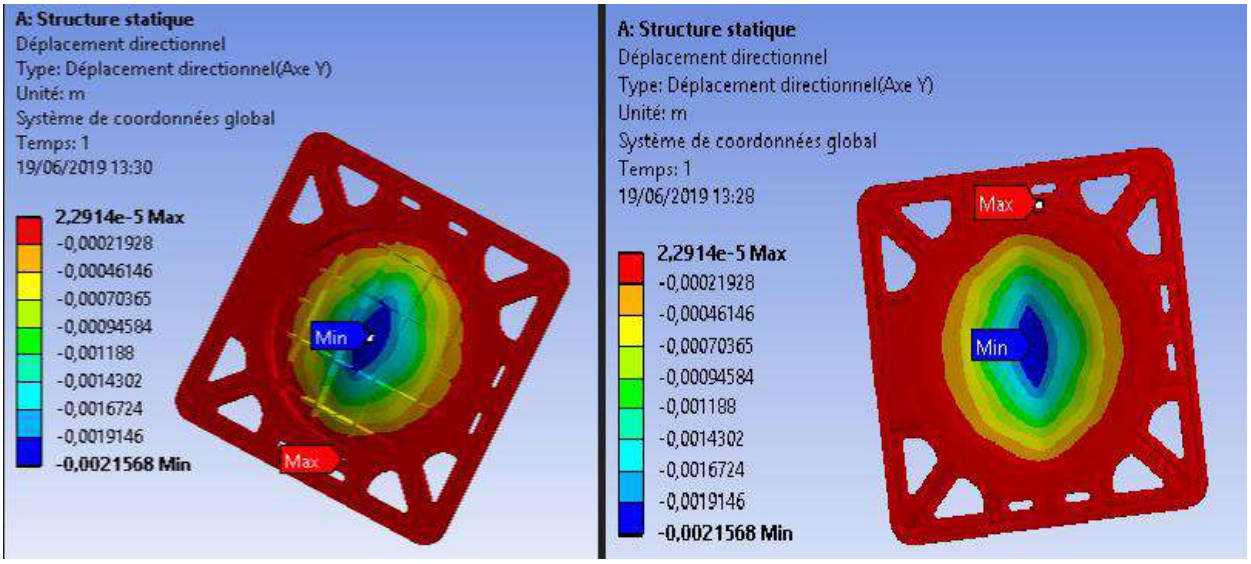


Figure III.7: Déplacement directionnel, Module d'élasticité E0 = 150 GPa.

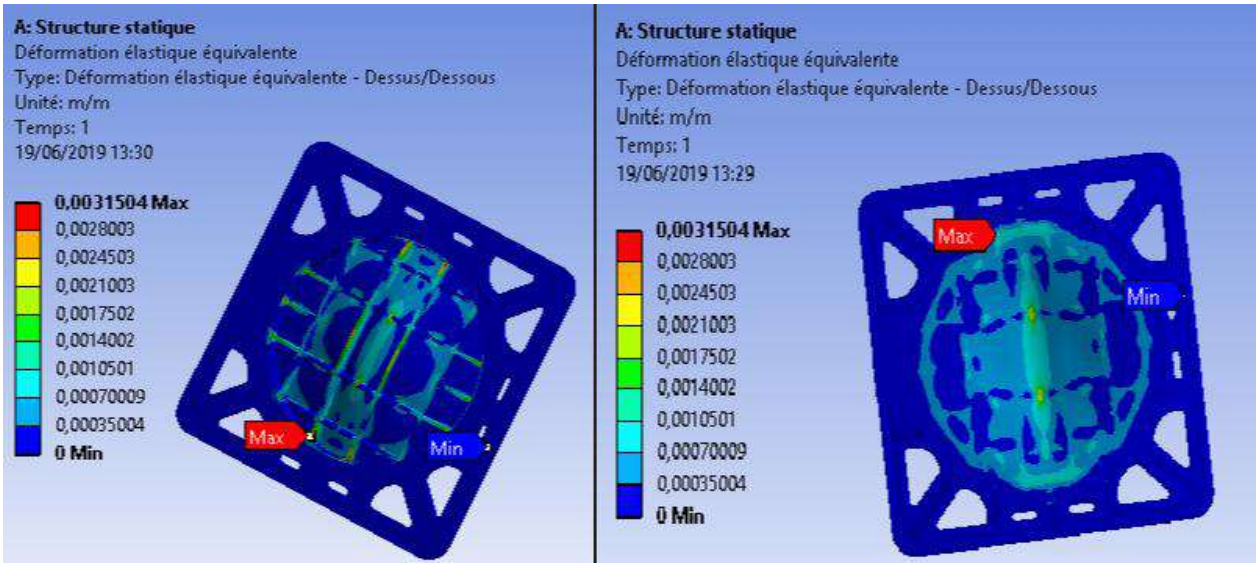


Figure III.8: Déformation élastique équivalente, Module d'élasticité E0 = 150 GPa.

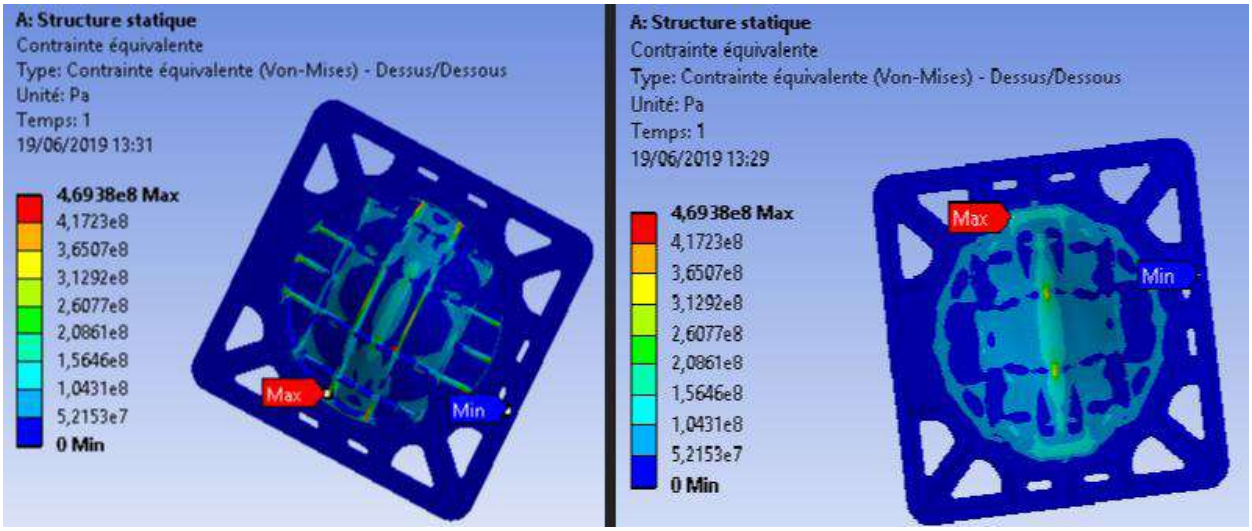


Figure III.9: Contrainte équivalente, Module d'élasticité E0 = 150 GPa.

Afin de bien analyser les résultats précédemment présentés, on a tracé lesproflis de déplacement V(m) en fonction de la longueur de la pièce pour les trois modules de Young étudiés 60, 100 et 150 GPa (voir Figure III10). A partir de cette Figure III, on peut conclut que le module de Young, *E*, joue un rôle très important sur la déformation des pièces. Le déplacement le plus important a été remarqué pour le cas de faible module de Young (E= 60 GPa) au milieu de la pièce, comme exemple on peut voir que le déplacement maximale est donné par : V=-5mm pour E=60GPa, -3mm pour E=100GPa et -2mm pour E=150GPa.

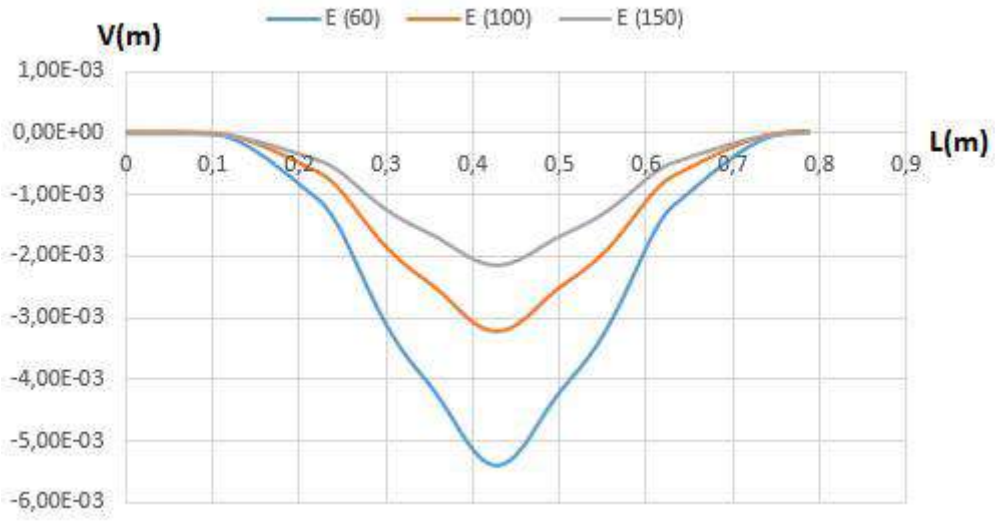


Figure III.10: Effet de module de Young.

III.5 L'effet de la considération de rainure

III.5.1 Sans rainure

Les Figure III de 11, 12 et 13illustrent respectivement les contours de déplacement, de déformation et de contraintes sur les faces supérieures et inférieures de la pièce pour le cas de la pièceconçue par FGL sans rainure pour une même valeur de module de Young (150 GPa)

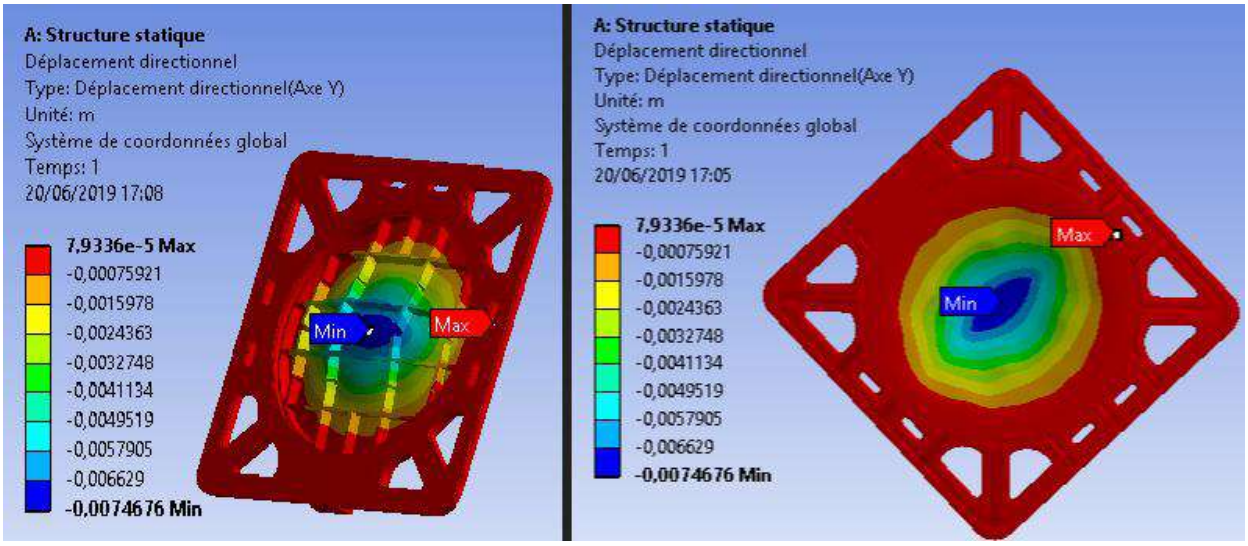


Figure III.11: Déplacement directionnel, sans rainure, E0= 150 GPa.

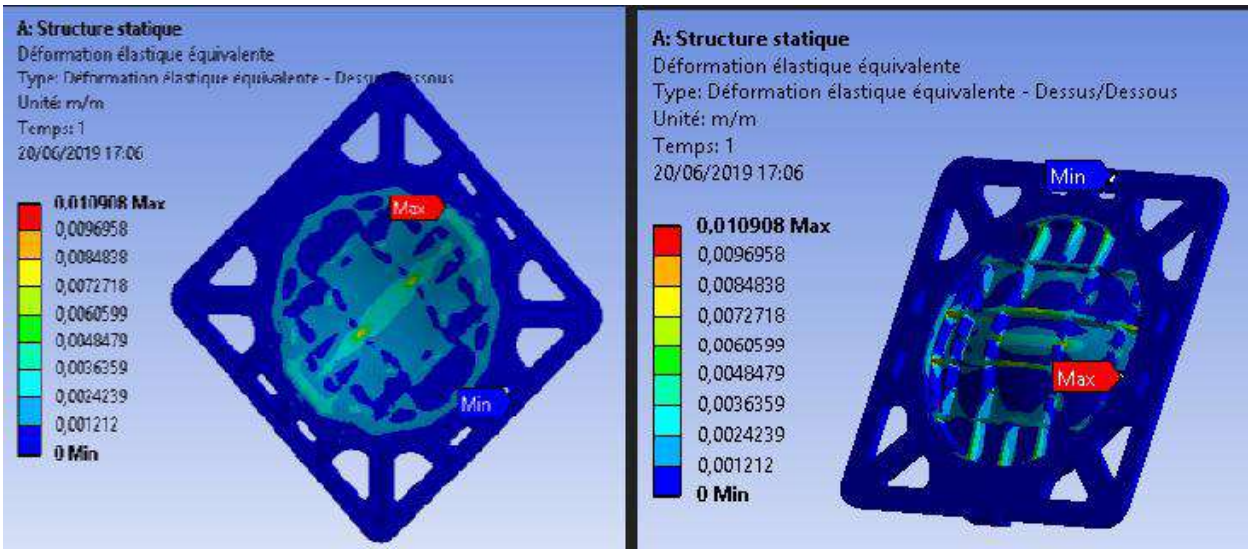


Figure III.12: Déformation élastique équivalente, sans rainure, E0= 150 GPa.

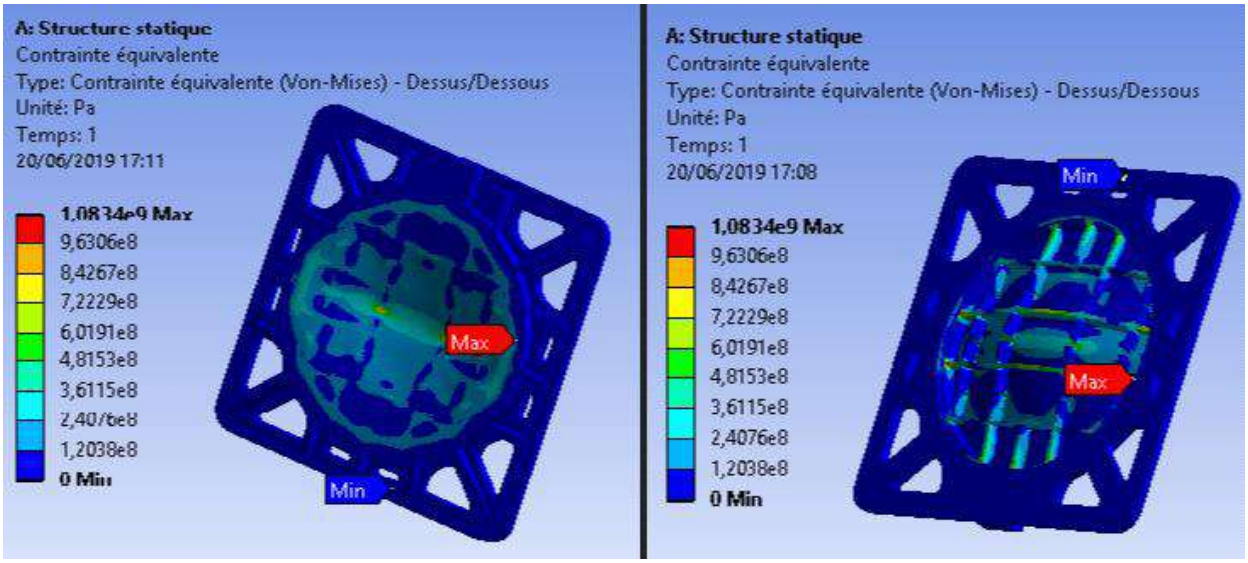


Figure III.13: Contrainte équivalente, sans rainure, E0= 150 GPa.

La Figure III14 présente la variation de déplacement en fonction de la longueur de la pièce pour les deux charges 26Ton et 60Ton, respectivement. On remarque que pour une charge de 60 Ton le déplacement atteint jusqu'à une valeur de 7.5mm et on peut observer aussi que la charge de 60Ton appliquée sur la pièce sans rainure crée une fissure sur les rainures.

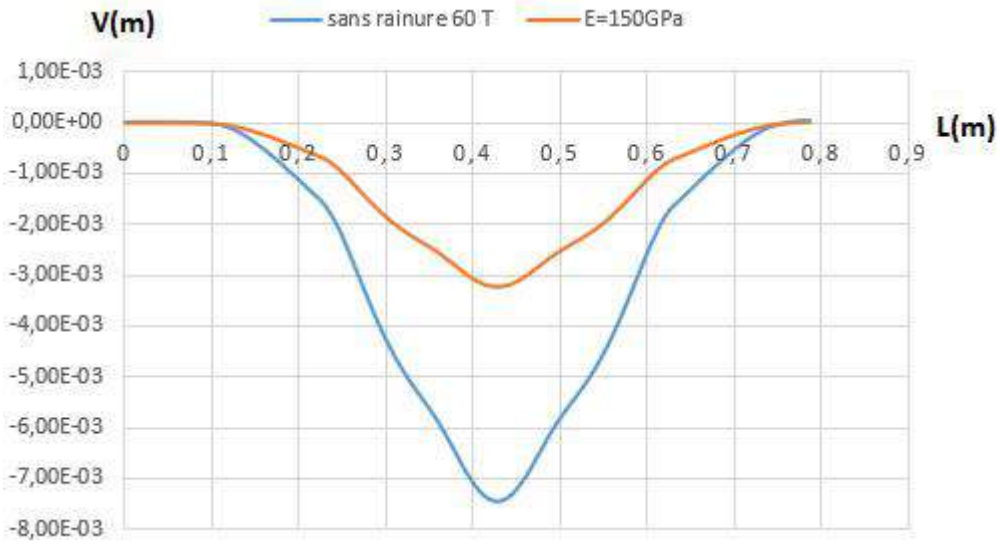


Figure 14: L'effet de charge.

III.5.1 Avec rainure

Les Figure III de 15, 16 et 17 présentent respectivement les contours de déplacement, de déformation et de contrainte sur les faces supérieure et inférieure pour le cas de la pièce conçue par FGL avec rainure pour une même valeur de module de Young (150GPa).

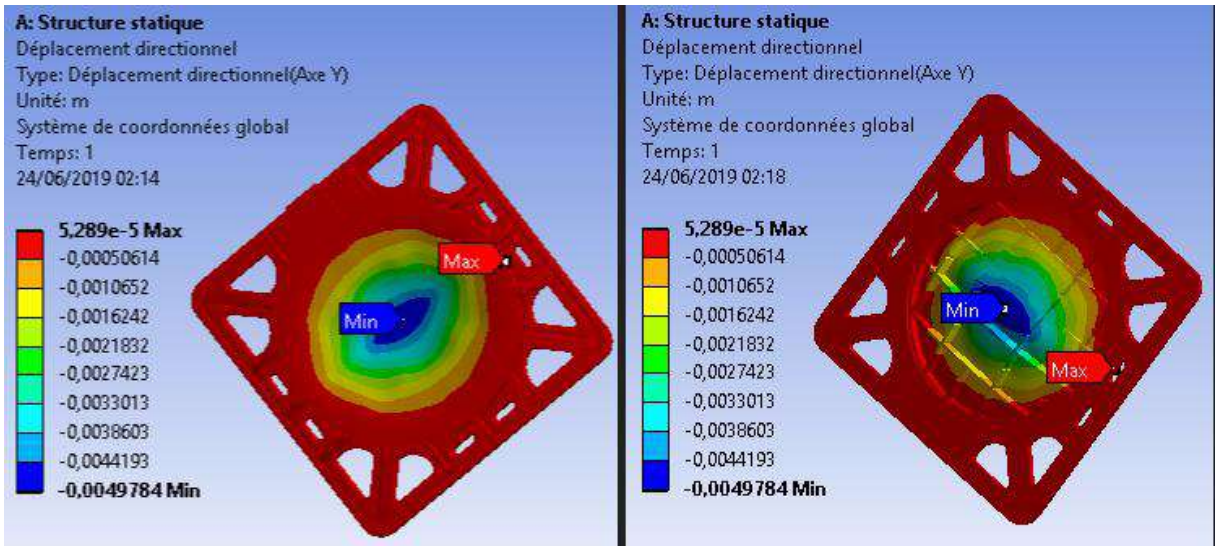


Figure III.15: Déplacement directionnel, avec rainure, E0= 150GPa.

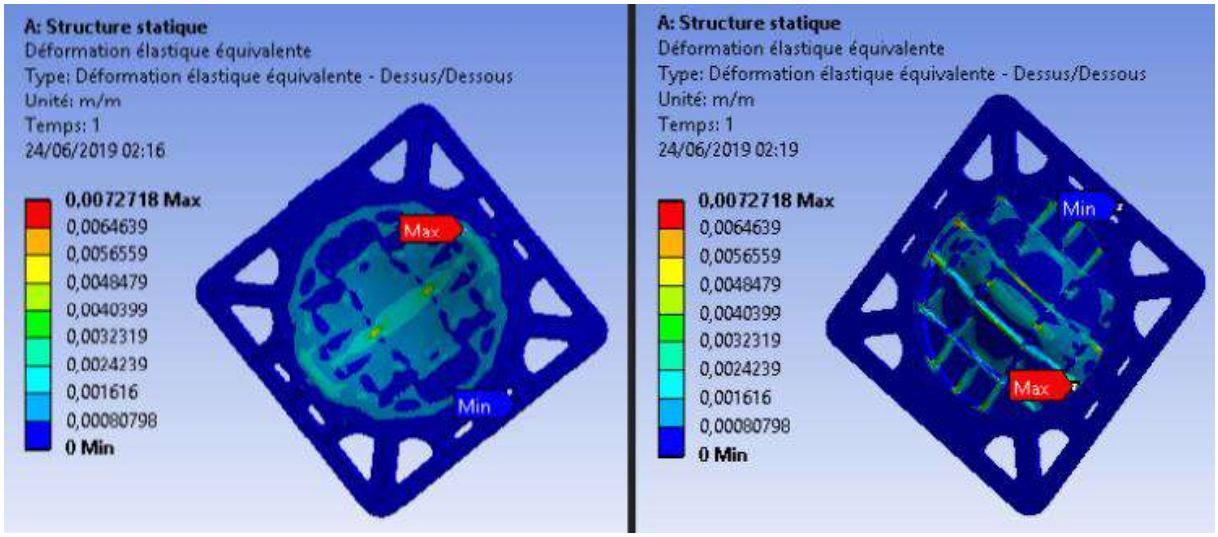


Figure III.16: Déformation élastique équivalente, avec rainure, E0= 150GPa.

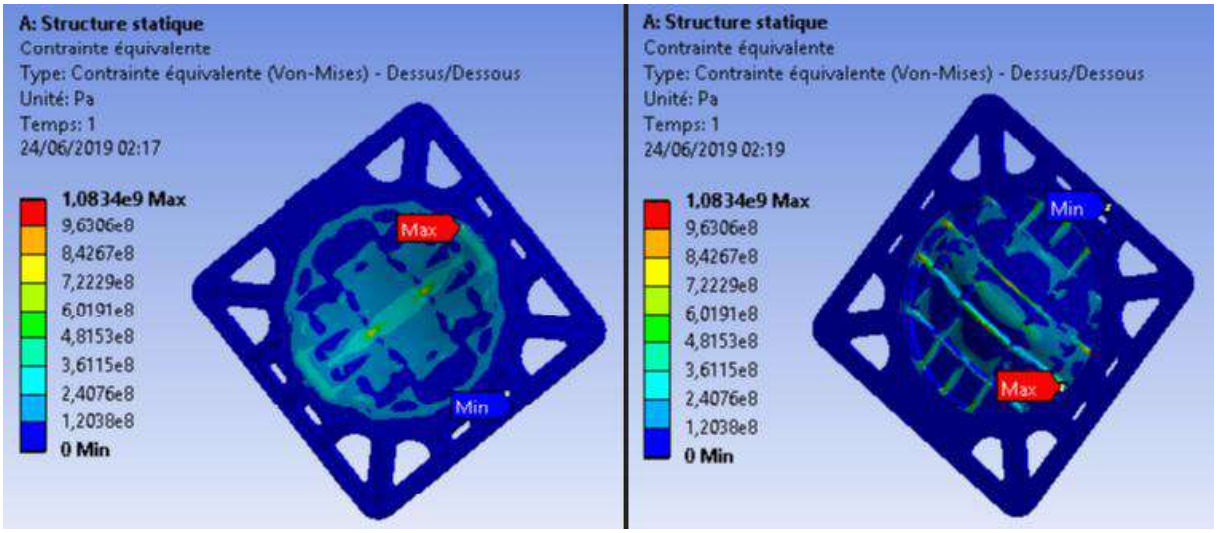


Figure III.17: Contrainte équivalente, avec rainure, E0= 150GPa.

La Figure III18 présente la variation de déplacement en fonction de longueur de la pièce pour les deux cas sans et avec rainure. On constate que l'effet de larainure je un rôle d'un paramètre de résistance sur la pièce, comme exemple on constate que le déplacement maximal pour la pièce sans rainure il atteint une valeur de V=-7.5mm, tandis que la pièce avec rainure le déplacement maximal est donné par une valeur de -4.97mm.

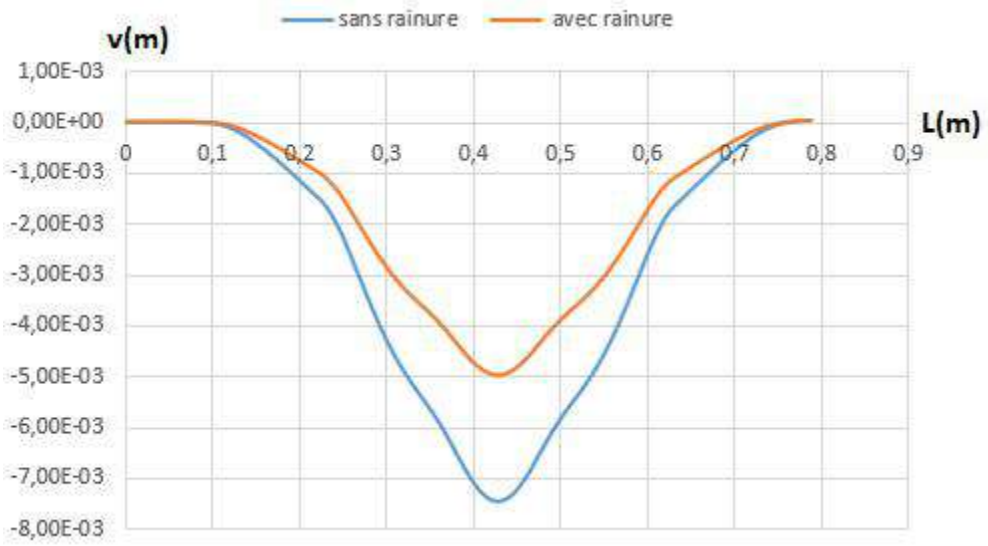


Figure III.18: Comparaison entre l'application d'une force avec et sans rainure sur la pièce.

III.6 L'effetde l'épaisseur

Afin d'examiner l'influence de l'épaisseur sur la structure de la pièce étudiée, nous avons choisi trois différentes épaisseurs : 20, 30 et 50mm.Les Figure III de 19, 20 et 21présentent respectivement les contours de déplacement, de déformation et de contrainte sur les faces supérieure et inférieure pour le cas de la pièce avec rainure conçue par FGL,même valeur de module de Young (150 GPa) et pour une épaisseur de 20mm.

Les Figure III de 22, 23 et 24 présentent respectivement les contours de déplacement, de déformation et de contraintes sur les faces supérieure et inférieure pour le cas de la pièce conçue par FGL pour une même valeur de module de Young (150 GPa), et pour une épaisseur de 30mm.

Les Figure III de 25, 26 et 27 présentent respectivement les contours de déplacement, de déformation et de contraintes sur les faces supérieure et inférieure pour le cas de la pièce conçue par FGL pour une même valeur de module de Young (150 GPa), et pour une épaisseur de 50mm. A partir de ces Figure III, on constate que l'épaisseur de 50mm joue un rôle très important, où la pièce résiste le maximum des forces appliquées.

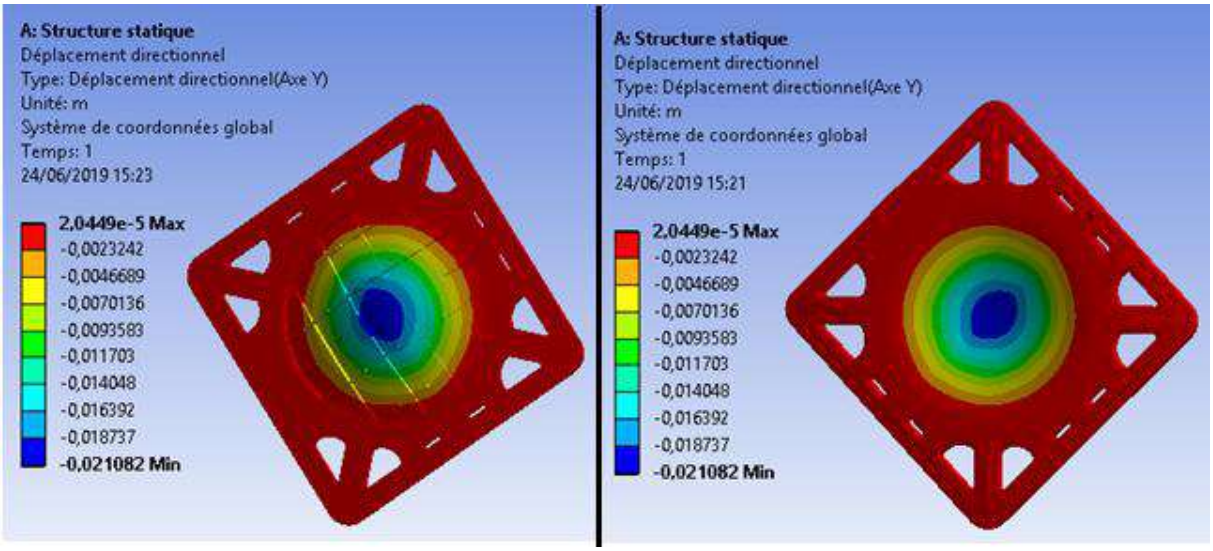


Figure III.19: Déplacement directionnel, épaisseur =20mm.

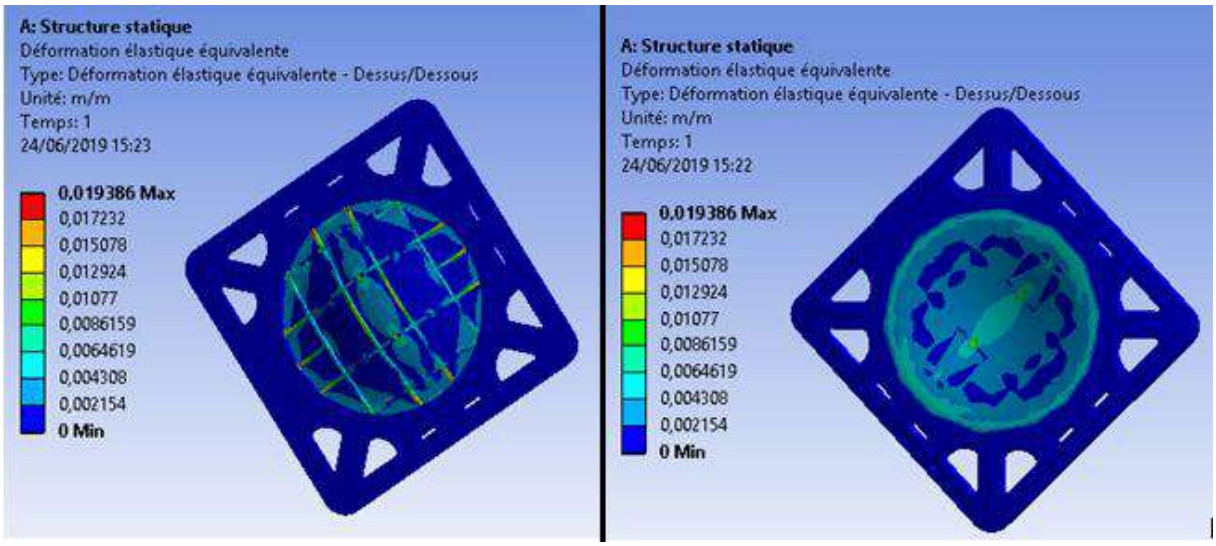


Figure III20: Déformation élastique équivalente, épaisseur =20mm.

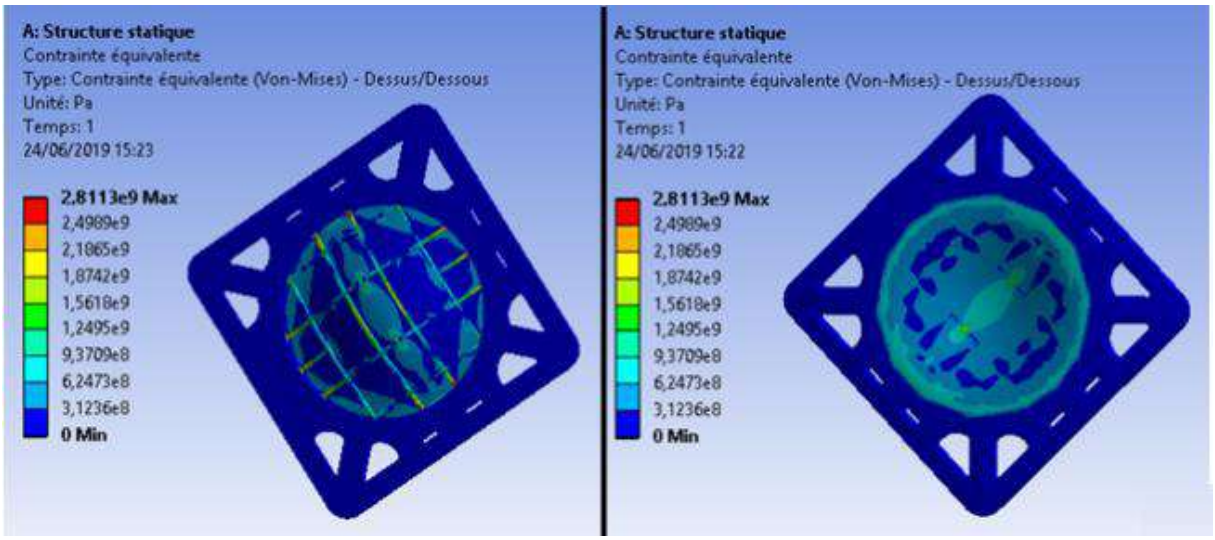


Figure III.21 : Contrainte équivalente, épaisseur =20mm.

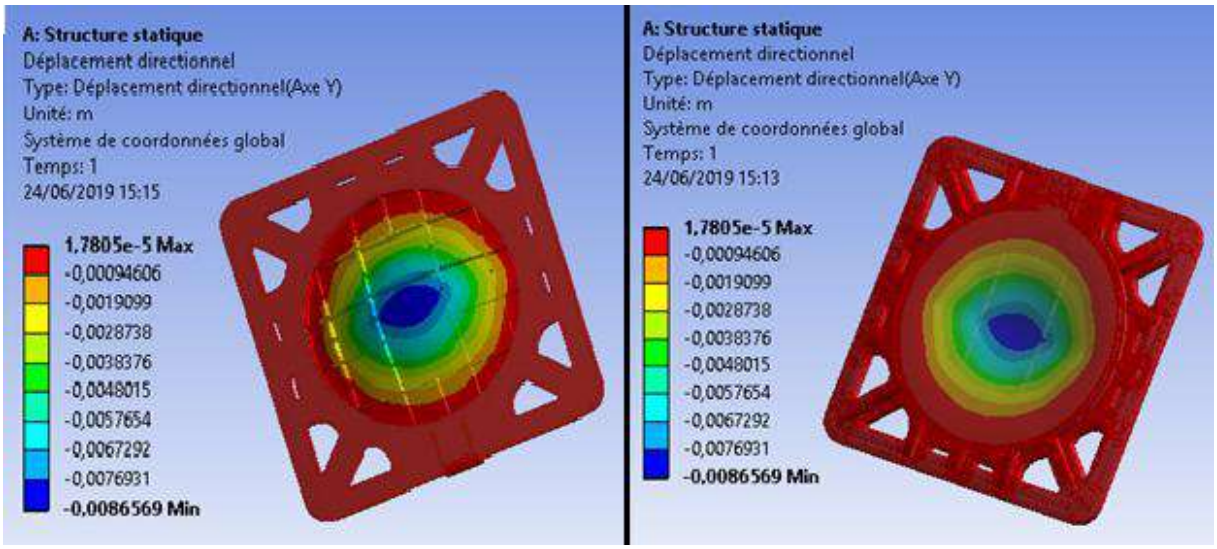


Figure III.22: Déplacement directionnel, épaisseur =30mm.

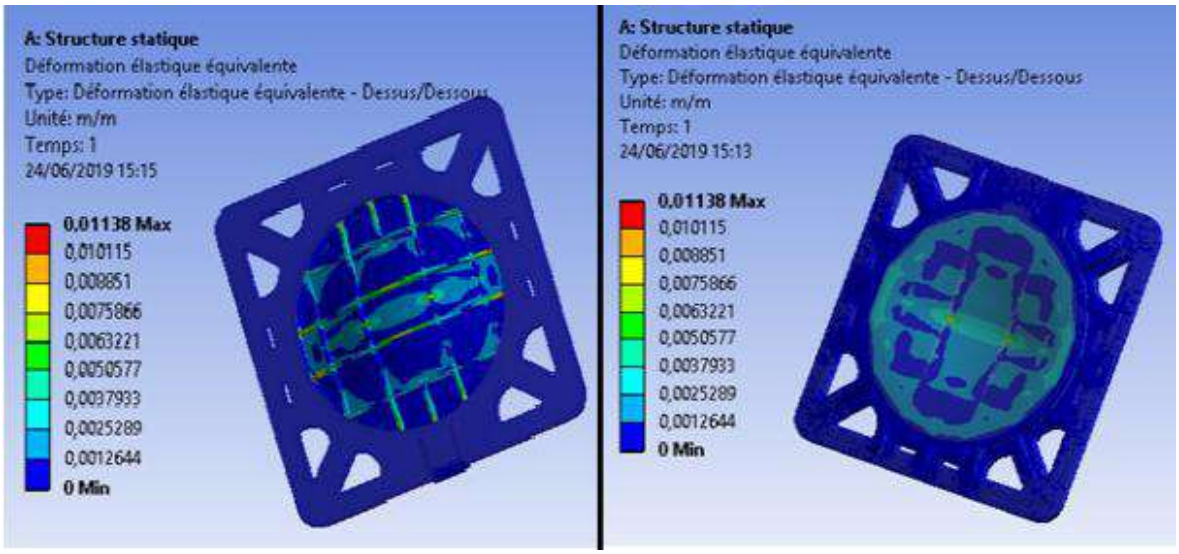


Figure III.23: Déformation élastique équivalente, épaisseur =30mm.

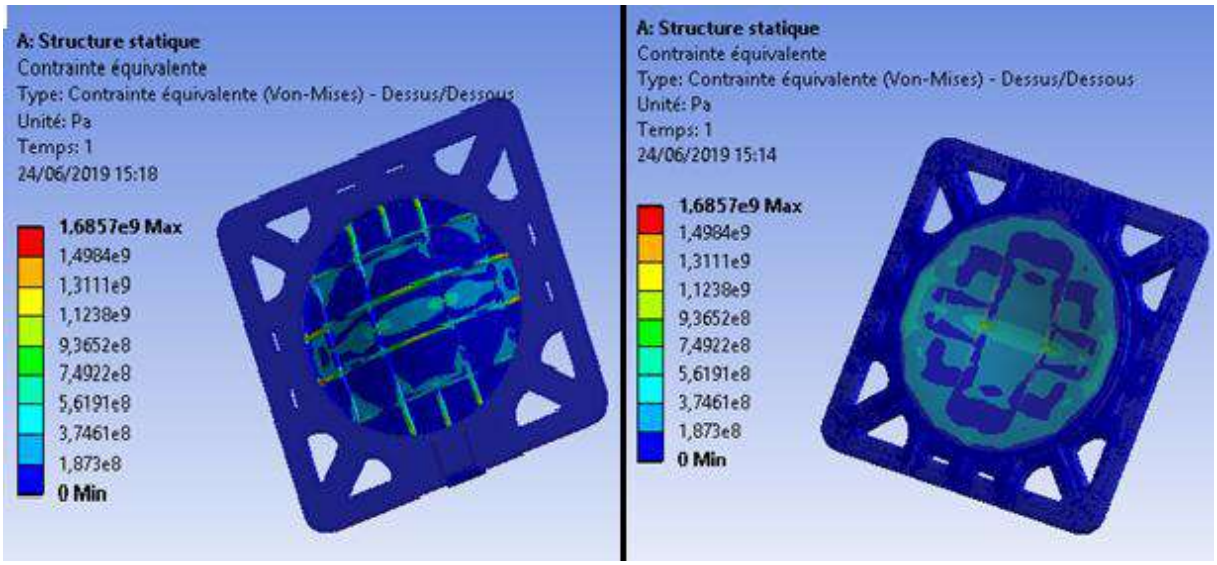


Figure III.24: Contrainte équivalente, épaisseur =30mm.

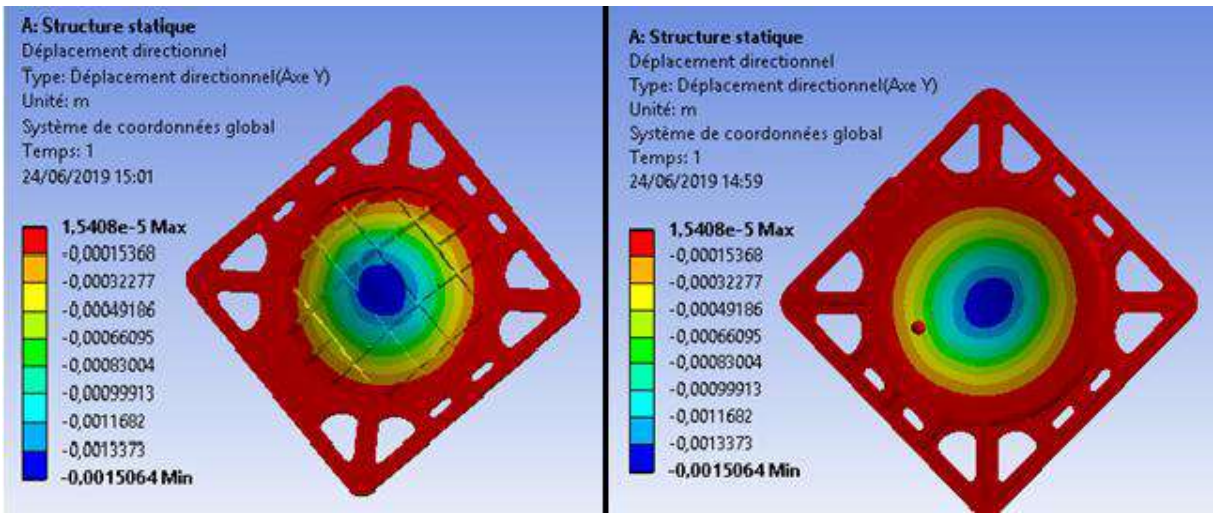


Figure III.25: Déplacement directionnel, épaisseur =50mm.

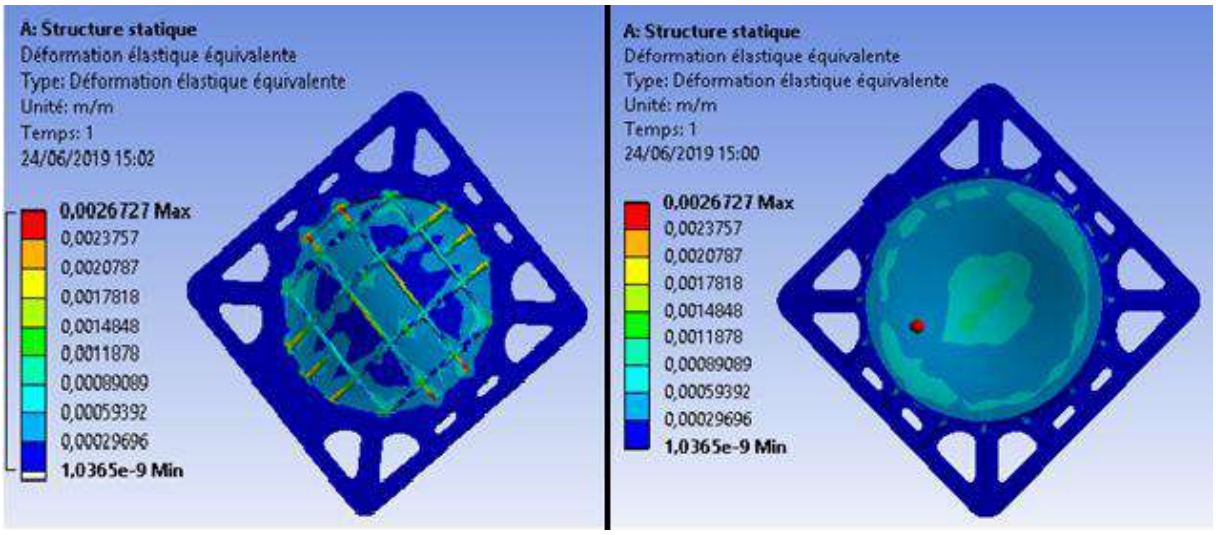


Figure III.26: Déformation élastique équivalente, épaisseur =50mm.

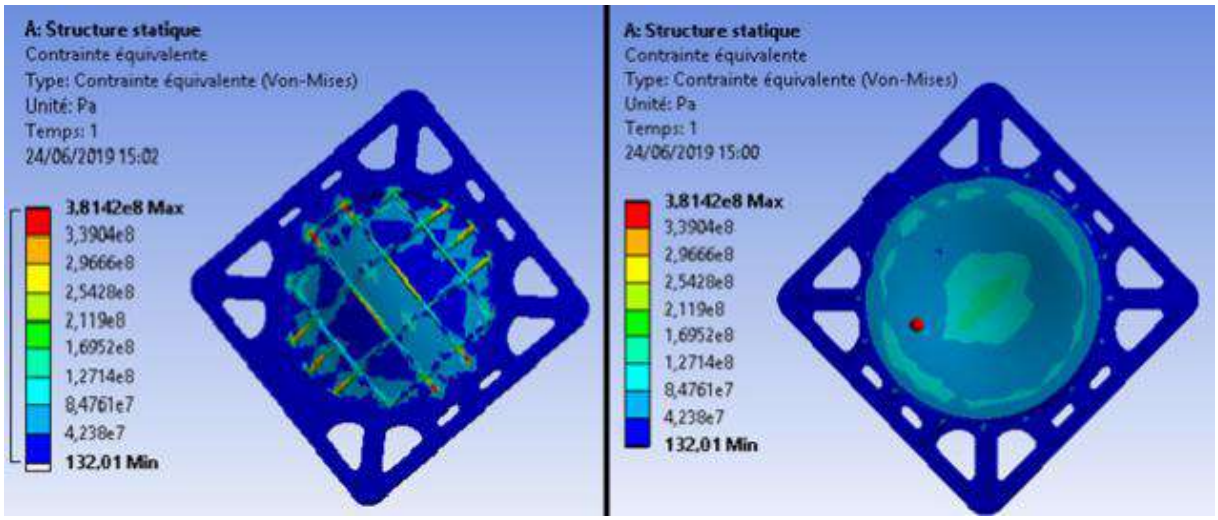


Figure III.27: contrainte équivalente, épaisseur =50mm.

La Figure III.28 présente la comparaison de déplacement en fonction de longueur de la pièce pour les différentes épaisseurs étudiées. On constate que le déplacement diminue avec l'augmentation de l'épaisseur.

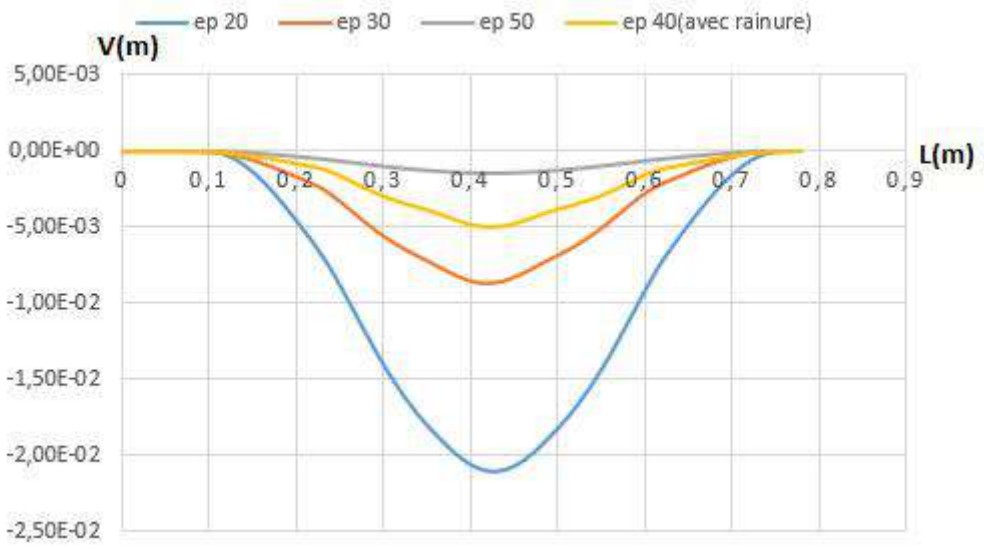


Figure III.28: L'effet de l'épaisseur.

III.7 L'effet du matériau : FGL et FGS (avec rainure)

Afin d'examiner l'influence de la nature de la fonte sur la structure de la pièce, ainsi nous avons étudié le cas de la fonte grise sphéroïdale. Les Figure III de 29, 30 et 31 présentent respectivement les contours de déplacement, de déformation et de contrainte sur les faces supérieure et inférieure pour le cas de la pièce conçue par FGS. On remarque que les valeurs maximales de déplacement, de déformation et de contrainte sont diminuées considérablement par rapport à la fonte FGL.

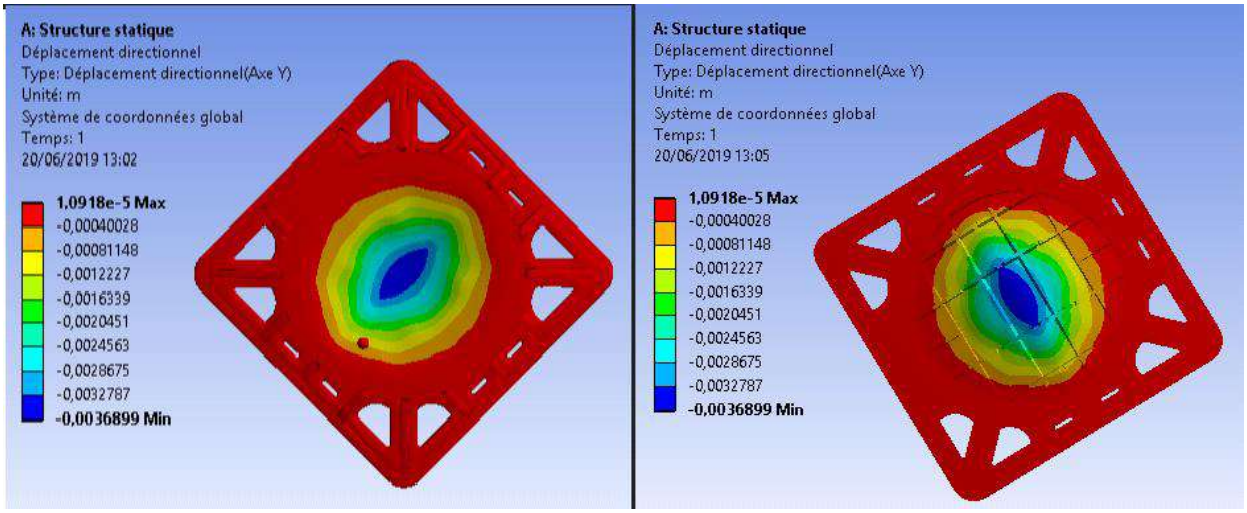


Figure III.29: Déplacement directionnel, fonte graisse sphéroïdale.

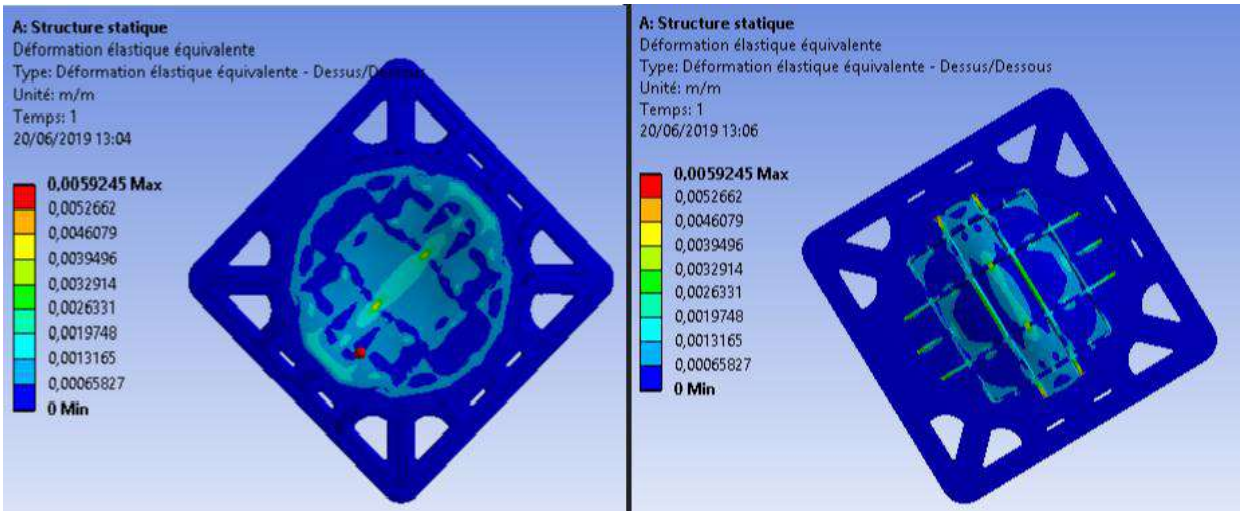


Figure III.30: Déformation élastique équivalente, fonte graisse sphéroïdale.

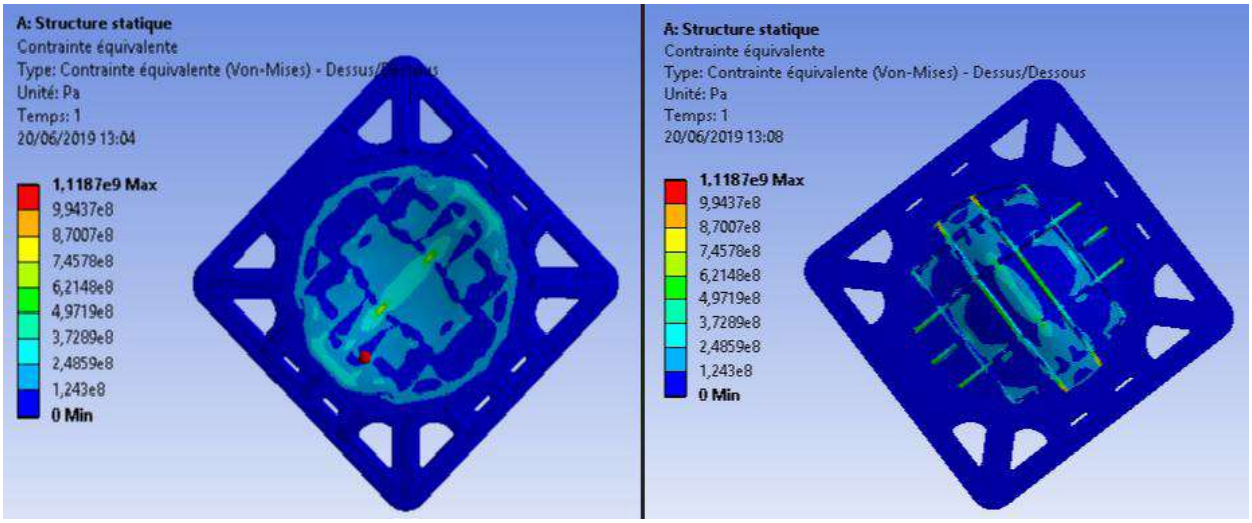


Figure III.31: Contrainte équivalente, fonte graisse sphéroïdale.

La Figure III32 présente la comparaison de déplacement en fonction de la longueur de la pièce pour les deux types de matériau, FGL et FGS. A partir de cette Figure III, on constate que la fonte grise sphéroïdaleaugmente la résistance de la pièce et diminue le déplacement jusqu'à environ 25% par rapport à FGL.

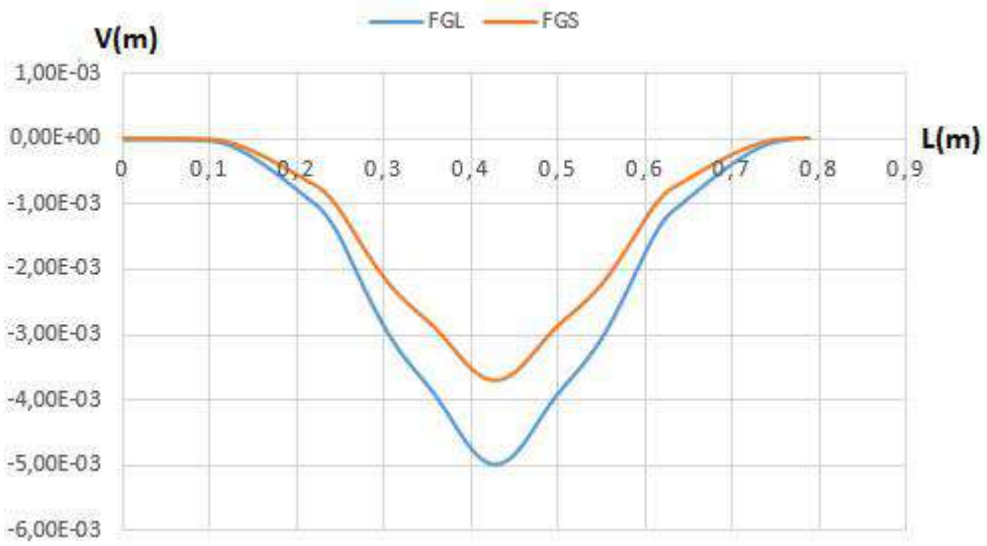


Figure III.32: Comparaison entre FGS et FGL.

II.8. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons vu la conception et la simulation de notre pièce, Ensuit nous avons discuté le résultat obtenu par la simulation numérique d'après avoir d'appliqué d'une force de compression sur la pièce avec lechangement d'épaisseur et modèle de Young.

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GENERALE

Aujourd'hui, les démarches de transferts de pièces en fonte FGS vers des pièces en fontes FGL sont courantes. Notamment par ce que les gains qu'elles apportent sont substantiels. Les fontes à matrice renforcée au silicium, notamment, sont aujourd'hui utilisées dans les applications hautement sollicitées et où la notion de masse est importante. Ces fontes doivent cependant être parfaitement caractérisées. Comme on a réglé pas mal de problèmes par simulation numérique, sans autant recours aux expériences pratiques, donc un gain de temps, et un gain en termes de cout, et un gain en termes de précision et d'exactitude.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] S. CLEMENT, "Chimie des matériaux hybrides", Presse Collège de France, 2013.

[2] J.P. MERCIER, G. Zambelli, W. Kurz, "Introduction à la science des matériaux", Presse Polytechniques et Universitaires Romandes, 3eme édition, 1999.

[3] M.F. ASHBY, "Choix des matériaux en conception mécanique : Technique et Ingénierie ", Dunod éditions, (ISBN 978-2-10-058968-5). 2012.

[4] G. MURRY, "Aciers, Généralités", Techniques de l'Ingénieur, traité Matériaux métalliques, M300, 2002.

[5] H.LE BRETON, "Manuel pratique du fondeur de fonte", Dunod éditions, Paris 1966.

[6] J. BARRALIS, G. MAEDER, "Précis de métallurgie, élaboration, structures, propriétés et normalisation", NATHAN, 5ème édition, p 144-152 et 108-110, Paris 1990.

[7] B. QUEFFELEC, "Formation aux plans d'expériences". Cours de formation intra-CEA de l'INSTN, Société SIER, septembre 1999.

[8] A. I. Khuri, J. A. Cornell, "Response surfaces: designs and analysis", Marcel Dakker, 2nd Edition, 1996.

[9] J. J. Droesbeke, J. Fine, G. Saporta, "Plans d'expériences, Application à l'entreprise", Technip, Ed Paris, 1997.

[10] R. Myers, D. Montgomery, "Response Surface Methodology, Process and productOptimization Using designed Experiments", Wiley, 1995.

[11] P. Schimmerling, J. C. Sisson, A. Zaidi, "Pratique des plans d'expériences", Ed Lavoisier Tec & Doc, 1998.

[12] G. E. P. Box, N. R. Draper, "Empirical Mode-Building and Response", John Wiley and Sons New-york, 669 pages, 1987

[13] K.M. ZWILSKY, E.L. LANGER**,** "ASM Handbook, Volume 1, properties and selection: irons, steels, and high-performance alloys"**,** Section: Publication Information and Contributors, 10èmeEdition, 1993.

[14] MICHEL GEIER, "Métallurgie de fonderie tome II"**,** Éditions Eyrolles, paris 1978.

[15] R.LE GOUIC, "Précis de soudage brassage et technique connexes", Éditions Eyrolles, Paris 1978.

[16] C.CHAUSSIN, G.HILLY**,** "Métallurgie**,** alliages métalliques tome I", DUNOD, Paris 1976, pages 126, 127, 129,135 247, 248.

[17] KELLAI Ahmed, "Etude comparative d'un rechargement d'une fonte truitée et une fonte grise par métallisation et par soudage", Mémoire de Magister, Ecole nationale Polytechnique d'Alger, 2009.

[18] L. CHUNMIN, S. BAOLUO, L. GUIJIANG, Y. Chao, "Effect of boronizing temperature and time on microstructure and abrasion wear resistance of Cr12Mn2V2 high chromium cast iron", Surface & Coatings Technology, 202 (2008) 5882–5886.

[19] T. LUNDSTEDT, E. SEIFERT, L. ABRAMO, B. THELIN, A. Nystrom, J. Pettersen, R. Bergman, "Experimental design and optimization", Chemometrics and intelligent laboratory systems, 42, 1998.

[20] T. LUNDSTEDT, E. SEIFERT, L. ABRAMO, B. THELIN, A. NYSTROM, J. PETTERSEN, R. BERGMAN, "Experimental design and optimization", Chemometrics and intelligent laboratory systems, 42, 1998.

[21] O. ALLAOUI, "Caractérisation des couches de borures élaborées sur un acier XC38", Thèse de doctorat, Université de Sétif, 2007.

[22] J. GOUPY, "Plans d'expériences pour surfaces de réponses", Edition Dunod, (2001).

[23] N. DRAPER, H. SMITH, "Applied regression analysis", Wiley, Ed New-York, 1981.

[24] F.L LAQUE, "Caractéristiques de corrosion des fontes à graphite sphéroidal courantes et des fontes Ni-Résist à graphite sphéroidal, présenté lors de la reunion de la section fontes à graphite sphéroidal de la GDIFS", Rapport technique, (1964).

[25] S.H. CHAFIAA, "Modélisation et influence des paramètres de cisaillement sur la réponse des structures", Mémoire de magistère, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2010.

[26] B. BARTHELEMY, "Notions Pratiques de La Mécanique de la Rupture". Eyrolles, 1980.

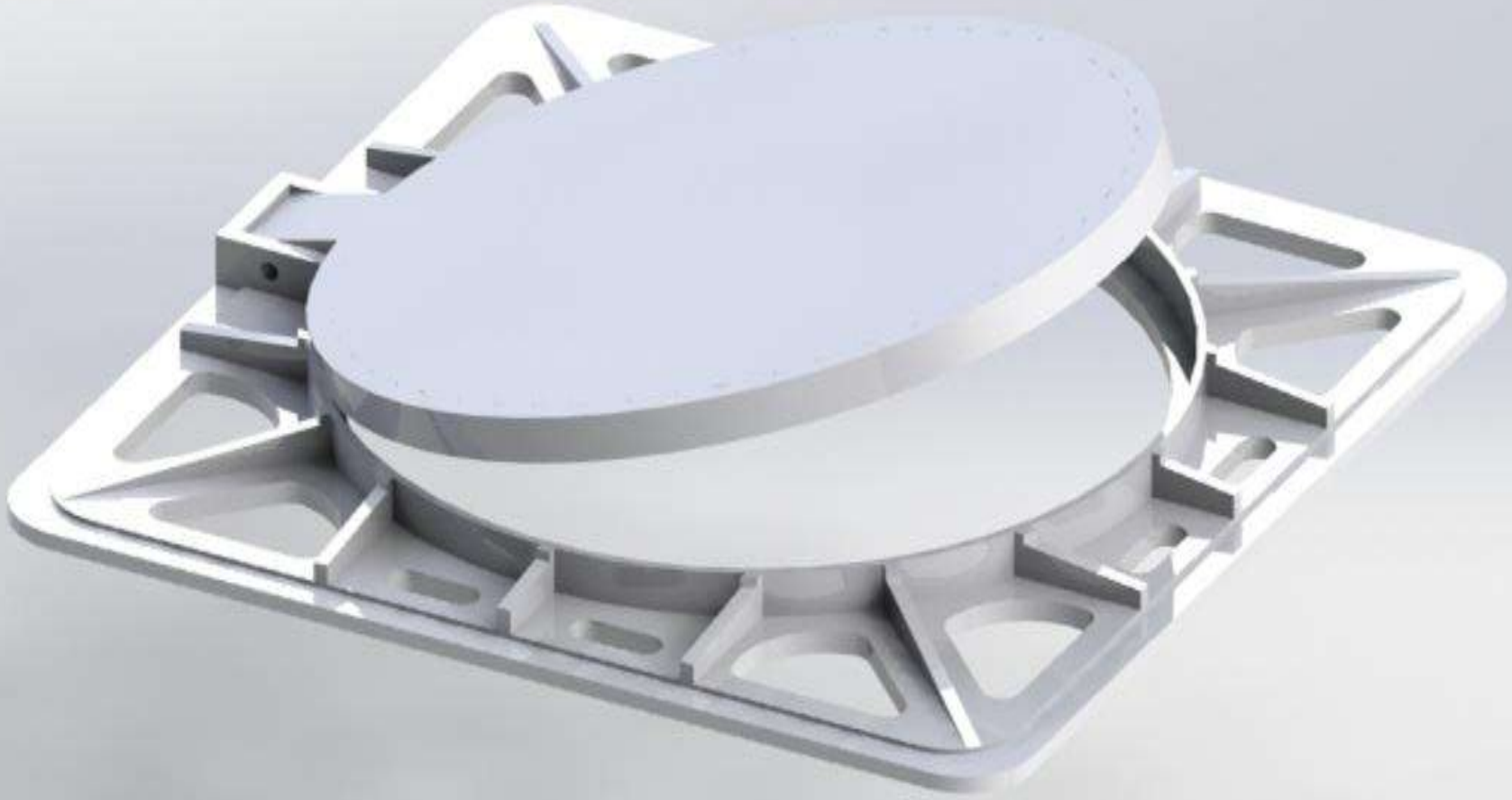
[27] S. MEKKATI, M. SMAILI, "Etude de défauts de gale dans la fonte à graphite lamellaire FGL20", Mémoire de Master, Université Yahia Fares de Médéa, 2017.

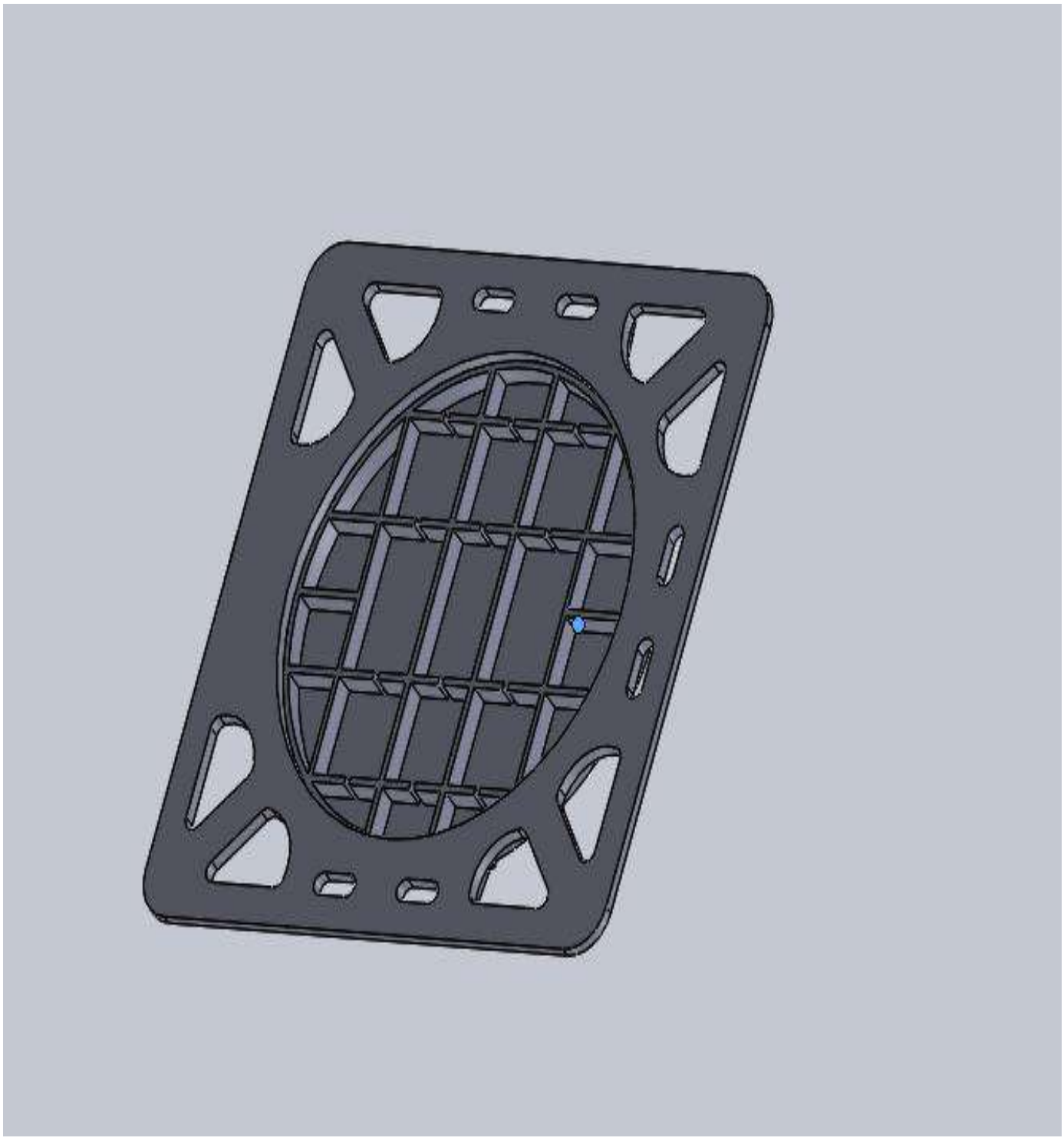
[28] R. BENSIMON, "Les Aciers", 2eme édition., Pyc presses, Paris, 1971.

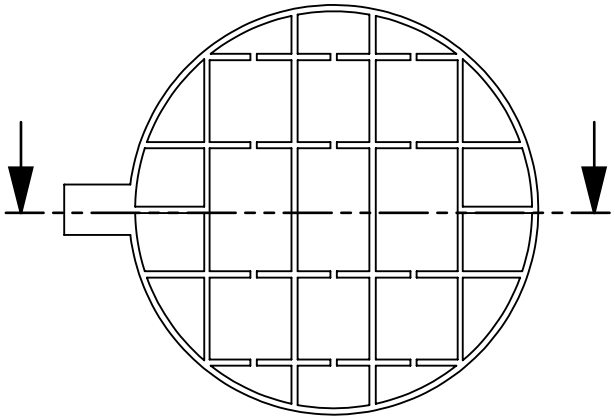
[29] M. COLOMBLE, "Matériaux Industriels, Matériaux Métalliques", Dunod paris, 2000.

[30] M. BLETRY, "Méthodes de Caractérisation Mécaniques des Matériaux", Paris, 2006-2007.

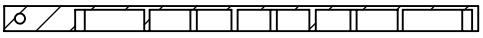
[31] J.C. MARGERIE, "Propriétés des Fontes Grises Ordinaires", techniques de l'ingénieur, traité Matériaux Métalliques.

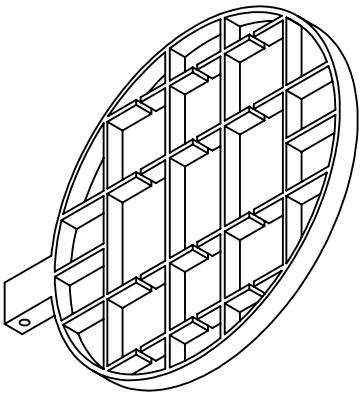






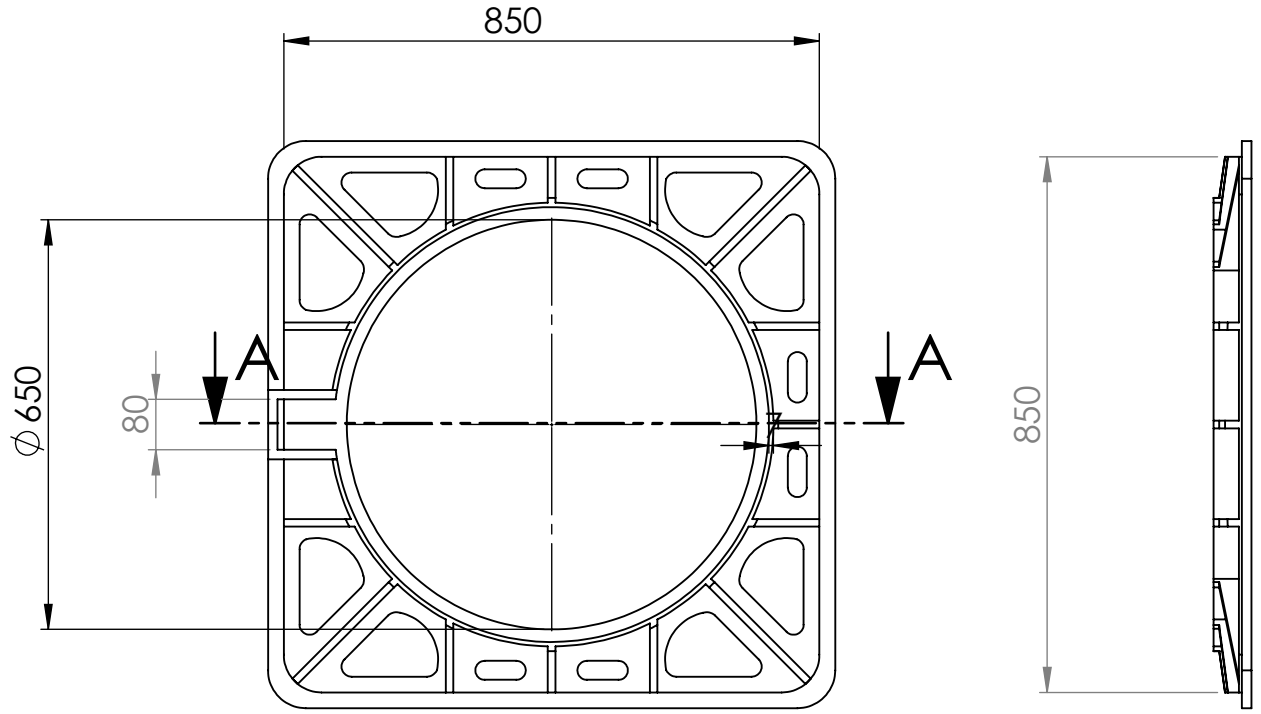






UNIVERSITE “Dr Yahia FARES” de Médéa

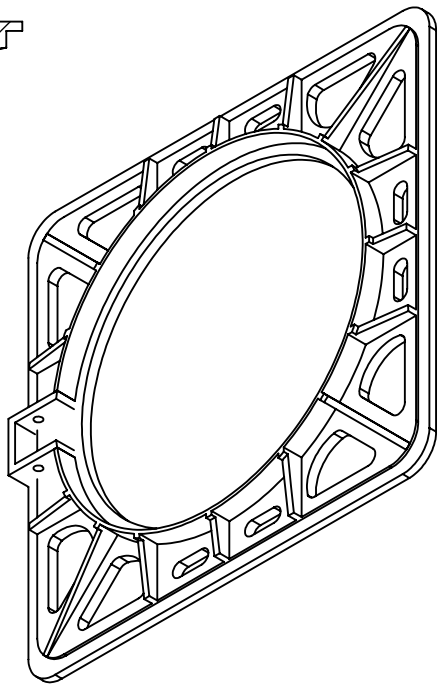
2 eme année master mecatronique	**tempon**	
promo: 2019	**bouguettaya said __haigoune adel**	





COUPE A-A

ECHELLE 1 : 12



UNIVERSITE “Dr Yahia FARES” de Médéa

2 eme année master mecatronique	**CADRE(850x850)**	**ECH:1/12**
promo: 2019	**bouguettaya said _haigoune adel**	